



## 基于博弈论的高校实验室废弃物 处理策略研究

沈超<sup>1</sup>, 盛林生<sup>2</sup>

(1. 嘉兴南湖学院 机电工程学院, 嘉兴 314001; 2. 嘉兴南湖学院 信息工程学院, 嘉兴 314001)

**摘要:** 近年来, 随着新时代生态文明建设的要求不断提高, 绿色发展理念日益深入人心, 高校实验室废弃物的排放及其污染问题越来越引起社会各界的关注。该文基于高校实验室处理废弃物的现状, 构建了实验室与第三方回收商之间的演化博弈模型, 分析两者在完全竞争或合作情况下的处理策略选择以及演化趋势。结果表明: 尽管实验室和第三方可能会随着时间的推移改变他们的合作和竞争策略, 但合作是他们增加收益的最佳选择; 最优惩罚机制有利于推动他们的合作趋势, 并且增加他们的收益。

**关键词:** 实验室废弃物; 博弈论; 处理策略; 惩罚机制

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230584

## Research on the Disposal Strategy of University Laboratory Waste Based on the Game Theory

SHEN Chao<sup>1</sup>, SHENG Linsheng<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing Nanhu University, Jiaxing 314001, China;

2. College of Information Engineering, Jiaxing Nanhu University, Jiaxing 314001, China)

**Abstract:** Recently, the concept of green development is attracted intensively with the continuous improvement of the requirements of ecological civilization construction in the new era. Simultaneously, the discharge and pollution of waste from university laboratories are greatly attracting attention from all sectors of society. Based on the current situation of waste disposal in university laboratories, the evolutionary game model between laboratories and third-party recyclers is constructed and the disposal strategy choices and evolutionary trends of both sides in the case of perfect competition or cooperation are analyzed. Those results indicate that cooperation is the best choice for them to increase profits, albeit laboratories and third parties may change their cooperation and competitive strategies over time. Moreover, the optimal reward and punishment mechanism is conducive to promoting their cooperation trend and boosting their profits.

**Key words:** laboratory waste; Game theory; disposal strategy; penalty mechanism

高校实验室是进行实践教学、科技创新和人才培养的重要场所, 近年来, 随着我国经济的快速发展和高校科技创新能力的提高, 高校实验室数量日益增多, 实验室废弃物排放及其引发的污染问题也越来越严重, 如何以合适的方式来处理这些废弃物开始得到企业、政府以及学术界大量关注<sup>[1-2]</sup>。

为了保护环境, 规范和加强高校实验废弃物的管理, 促进学校健康绿色发展, 政策发挥着重

要的作用<sup>[3]</sup>。教育部在 2005 年出台了《国家环保总局关于加强高等学校实验室排污管理的通知》, 严禁将实验室在科研教学等活动中产生的废弃物直接向外界排放。2020 年修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中规定, 学校应当开展生活垃圾分类及其他固体废物污染环境防治知识普及和教育, 同时还详细规定了危险废物的规范化管理方式。

博弈论主要是利用数学理论和方法, 研究具

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY22E020006)。

作者简介: 沈超, 硕士, 助理实验师, 主要从事实验教学及管理工作。E-mail: shenchao@jxnhu.edu.cn

有竞争和斗争的性质或者现象。演化博弈是将博弈理论分析与动态演化相结合,考虑在有限理性条件下,部分博弈参与者在博弈初期产生的最优策略被其他博弈参与者不断采用,并在博弈过程中逐渐演化成稳定策略<sup>[4]</sup>。文献[5]利用演化博弈理论构建了高校实验技术人员之间职称评聘的演化博弈模型。通过分析门槛制和锦标赛制两种职称制度下博弈参与人合作与否的行为选择,比较两种职称政策各自的优势与不足,提出了在实验技术人员队伍中实施门槛制职称政策的建议。文献[6]提出一种基于博弈论与云物元分析的高校实验室文化建设评价模型,该模型在建立高校实验室文化建设评价指标体系的基础上,运用博弈论模型与云模型确定各个评价指标的权重及克服指标的模糊性和随机性,并通过实例验证了该模型的可靠性。

我国高校实验室作为进行各类科学实验的场所,所产生的废弃物数量庞大、种类繁多,目前高校实验室的废弃物主要有两种处理方式:一种是委托第三方专业机构运输和处理,但由于第三方企业能力有限,不能完全满足各高校处理复杂废弃物的需要;另一种是部分高校利用自身资源建设专业的废物处理系统,经初步处理达到相关标准后再排入公共污水网<sup>[7]</sup>。国内外学者对高校实验室废弃物的管理问题已有大量的研究。文献[8]为解决高校生物废弃物处理的问题,根据高校生物废弃物的分类,制定了从“分类收集”到“市政清运”的处理流程,依托平台严格管理机制和信息化管理模式,构建了一个大型高校生物废弃物处理平台。文献[9]基于高校实验室废弃物处理难的现状,提出构建学校、院系和实验室的三级管理体系,并通过建设分类收集机制、完善协同体系、加强制度建设等举措来推进高校实验室废弃物处理的科学管理。文献[10]将绿色化学的概念应用到化学废物的管理中,根据绿色化学原则对化学实验室中最具危险性的化学试剂进行替换,并更新了相应的实验指南,有效降低了相关实验室风险。文献[11]分析介绍了北美洲大学实验室废弃物的分类管理办法,主要包括对实验室废弃物的属性分类,并按照属性分类进一步细分实验室废弃物,最后阐述了实验室废弃物从包装与标记、收取、运输到环卫督查等一系列管理流程,为我国实验室废弃物的管理工作提供了参

考。文献[12]对中美两国医科院校实验室废弃物管理现状进行比较,调查发现美国医科院校实验室废弃物管理均设置了专门的管理机构,并研究了其实实验室废弃物的收集储存方法及最终处理方法,为国内实验室废弃物的管理提供借鉴。文献[13]研究一家意大利医院手术室内废弃物的分类情况,通过由医院多名成员组成专家小组进行调查研究,调查发现废弃物管理中人员的分类操作是否规范是做好废弃物管理的关键。文献[14]通过调查埃沃拉大学实验室2007—2021年废弃物的数量及成分,提出实验室废弃物管理的重点是正确区分废弃物种类和选择专业的废弃物管理运营商。文献[15]通过分析国内外实验生物废弃物分类现状,结合高校自身实际情况,制定了实验室生物废弃物分类图表,构建了基于分类指南的高校实验室生物废弃物管理体系,为其他高校实验室废弃物管理体系建设提出意见。以上这些文献主要从直观、定性的视角去分析,少有文献从定量的角度去研究实验室回收问题。本文采用博弈论的方法,立足现阶段高校实验室废弃物处理现状,研究高校实验室废弃物在不同情况下的最优回收处理策略。

## 1 模型描述及假设

### 1.1 模型描述

高校实验室作为科研活动的重要场所,每天都会产生大量废弃物,如果不及时处理将会造成严重的环境和生态问题。由于高校学科特点不一,实验室废弃物的情况有较大的差异,不同高校实验室经费预算有限,各高校需要考虑以上各方面因素来决定实验室废弃物的处理方式,而第三方的处理回收商也会考虑合作是否能带来收益从而决定是否与高校建立合作。

设立演化博弈模型对高校实验室与第三方回收商合作意愿的影响进行分析,博弈矩阵如表1所示。博弈中实验室和第三方都有两种策略,即合作和不合作。当实验室选择不合作时,将由自身承担回收工作,此时需承担自建处理设备和回收的费用,运营成本也会增加;而当实验室选择合作时将由第三方负责回收处理业务,但同时也存在着回收处理过程中不可控的合作风险。当第三方选择不合作时,将为其他单位回收处理废弃物;当第三方选择合作时则负责该实验室的回收

处理业务，同时承担因向实验室提供服务而失去其他单位回收处理业务的转移成本。

表 1 实验室和第三方的处理策略选择

名称	不合作	合作
实验室	自身回收处理	委托第三方回收处理
第三方	为其他单位回收处理	为该实验室回收处理

### 1.2 模型假设

1) 实验室的基本经费大于其自建设备处理与选择合作的机会成本之和，即  $v_1 > c_1 + \delta_1$ ；第三方回收商的基本收益大于自身选择合作的转移成本，即  $v_t > \delta_t$ 。

2) 为了确保双方有合作的意愿，双方的预期收益大于其合作带来的风险与投入，即  $\Delta v_1 > \delta_1 + \mu + k_t$ ， $\Delta v_t > \delta_t + c_t + \gamma$ 。

### 1.3 符号说明

本文所用的符号及说明如下表 2 所示。

表 2 符号说明

符号	符号说明
$v_1$	实验室的基本经费
$c_1$	实验室自建设备处理的成本
$\delta_1$	实验室选择合作的机会成本
$v_t$	第三方回收商的基本收益
$\delta_t$	第三方回收商选择合作的转移成本
$c_t$	第三方回收商处理的运营成本
$\alpha$	实验室产生废弃物数量超标的概率
$k_t$	实验室因废弃物超标而产生的环境成本
$\mu$	第三方回收商因废弃物超标而需要处理产生的额外收益
$\beta$	第三方回收商处理废弃物不及时的概率
$k_t$	实验室因处理废弃物不及时而产生的环境成本
$\gamma$	第三方回收商处理废弃物不及时而受到合作实验室的惩罚
$\Delta v_1$	达成合作后实验室的潜在收益
$\Delta v_t$	达成合作后第三方回收商的潜在收益
$p$	实验室选择合作的概率
$q$	第三方回收商选择合作的概率

## 2 模型构建与求解

根据上述分析与假设，构建演化博弈模型，其收益矩阵如表 3 所示。博弈中当实验室与第三方都采取不合作策略时，实验室的收益为其基本经费减去自身回收所需的处理成本，即  $v_1 - c_1 - \alpha k_1$ ，而第三方的收益为其基本收益  $v_t$ ；当实验室选择不合作策略，第三方选择合作策略时，实

验室的收益仍为  $v_1 - c_1 - \alpha k_1$ ，第三方的收益为基本收益扣除选择合作的转移成本，即  $v_t - \delta_t$ ；当实验室选择合作策略，第三方选择不合作策略时，实验室的收益为其基本经费减去自身回收的所需处理成本与选择合作的机会成本，即  $v_1 - c_1 - \delta_1 - \alpha k_1$ ，而第三方的收益仍为  $v_t$ ；当两者都采取合作策略时，实验室的收益由基本经费、惩罚机制和潜在收益所决定，即为  $v_1 + \Delta v_1 - \delta_1 - \alpha k_1 - \beta k_t + \beta \gamma$ ，第三方的收益由基本收益、惩罚机制、运营成本、合作的转移成本和潜在收益决定，即为  $v_t + \Delta v_t - c_t - \delta_t + \alpha \mu - \beta \gamma$ 。

表 3 实验室和第三方回收商演化博弈的收益矩阵

第三方	实验室	
	合作( $q$ )	不合作( $1-q$ )
合作( $p$ )	$v_1 + \Delta v_1 - \delta_1 - \alpha k_1 - \beta k_t + \beta \gamma$ , $v_t + \Delta v_t - c_t - \delta_t + \alpha \mu - \beta \gamma$	$v_1 - c_1 - \delta_1 - \alpha k_1$ , $v_t$
不合作( $1-p$ )	$v_1 - c_1 - \alpha k_1$ , $v_t - \delta_t$	$v_1 - c_1 - \alpha k_1$ , $v_t$

利用复制动态方程<sup>[16]</sup>求解演化稳定策略，可得实验室采取合作策略的复制动态方程为：

$$\frac{dp}{dt} = p(U_1^c - \bar{U}_t) = p(1-p)(U_1^c - U_1^m) = p(1-p)[q(\Delta v_1 + c_1 - \beta k_t + \beta \gamma) - \delta_1] \tag{1}$$

同理可得第三方回收商采取合作策略的复制动态方程为：

$$\frac{dq}{dt} = q(U_t^c - \bar{U}_t) = q(1-q)[p(\Delta v_t - c_t + \alpha \mu - \beta \gamma) - \delta_t] \tag{2}$$

根据式(1)和(2)可得： $p^* = 0$ ， $p^* = 1$ ， $p^* = \frac{\delta_1}{\Delta v_1 - c_1 + \alpha \mu - \beta \gamma}$ ； $q^* = 0$ ， $q^* = 1$ ， $q^* = \frac{\delta_t}{\Delta v_t + c_1 - \beta k_t + \beta \gamma}$ 。

通过分析两个复制动态方程雅可比矩阵的局部稳定性<sup>[17]</sup>，可得以下 5 个平衡点，分别为： $O(0,0)$ ， $U(0,1)$ ， $V(1,0)$ ， $W(1,0)$ 及  $M(p^*,q^*)$ 。其中， $O(0,0)$ ， $W(1,0)$ 为稳定点， $U(0,1)$ ， $V(1,0)$ 为不稳定点， $M(p^*,q^*)$ 为鞍点，如表 4 所示。

表 4 平衡点局部稳定性

平衡点	det J	tr J	局部稳定性
$O(0,0)$	$> 0$	$< 0$	演化稳定点
$U(0,1)$	$> 0$	$> 0$	不稳定点
$V(1,0)$	$> 0$	$> 0$	不稳定点
$W(1,1)$	$> 0$	$< 0$	演化稳定点
$M(p^*,q^*)$	$> 0$	0	鞍点

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 竞合演化分析

结合表3和表4可知,  $U$ 点对应实验室选择合作而第三方选择不合作的情况, 此时实验室采取合作策略, 但第三方对合作后所能达到的收益并不满意从而不选择合作;  $V$ 点对应实验室选择不合作而第三方选择合作的情况, 此时第三方采取合作策略, 但实验室不满意其提供的回收处理服务, 从而不选择合作。以上两种情形双方因合作失败需承担一定的损失, 两者容易趋向完全竞争, 因此,  $U$ 、 $V$ 两点为不稳定点。

$O$ 点表示实验室与第三方都采取不合作的策略, 当实验室不信任第三方, 第三方不愿为实验室服务时, 双方就处于完全不合作状态。 $W$ 点表示实验室与第三方均选择合作的情形, 当实验室与第三方达成协议, 实验室将废弃物的处理业务完全交与第三方, 第三方为实验室提供优质的回收处理业务, 双方处于完全合作状态。完全合作与不合作状态一般都能维持较长时间, 且是不稳定状态的演化终点, 因此,  $O$ 点和 $W$ 点均为稳定点。

根据上述稳定性分析, 可得演化相位图, 如图1所示。

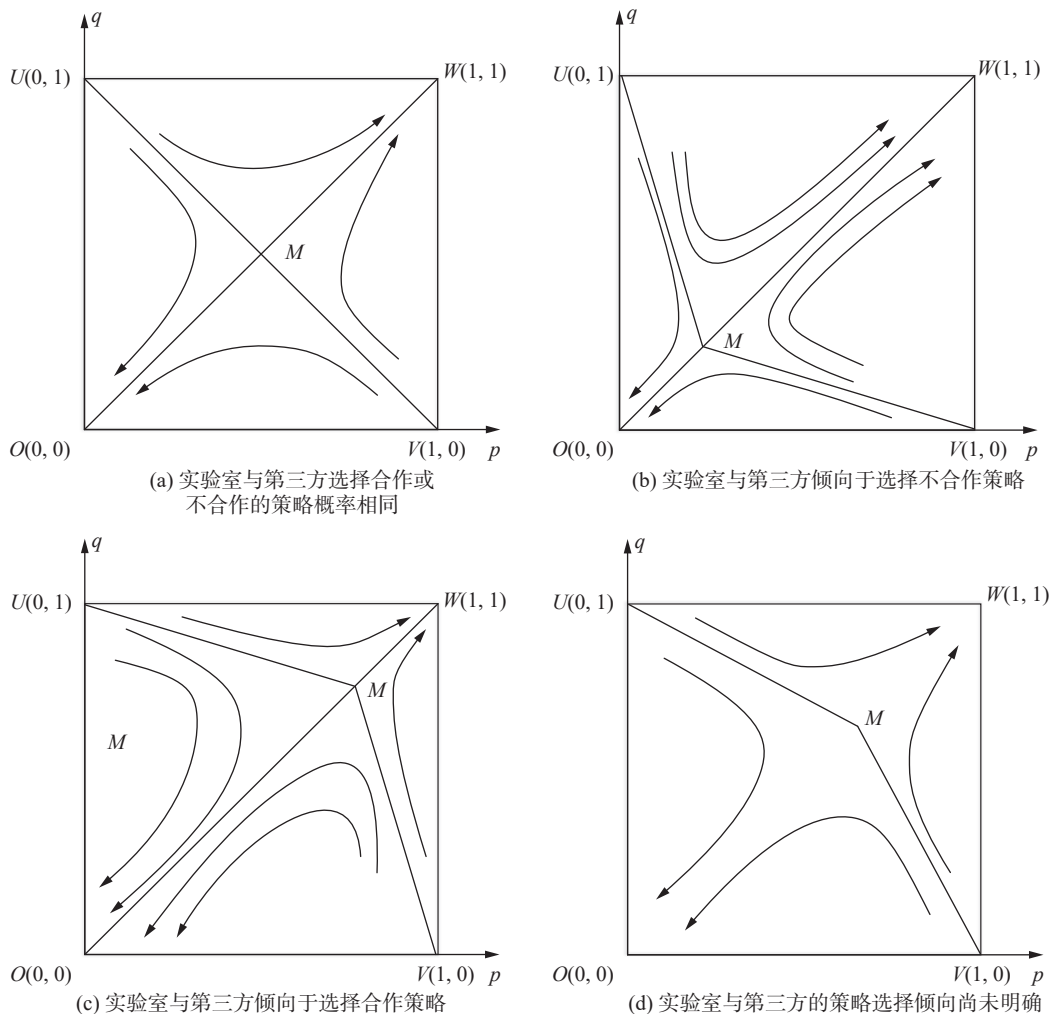


图1  $M$ 点在不同位置时实验室与第三方的演化规律图

定义四边形  $UMVO$  的面积为  $D_1$ ,  $UMVW$  的面积为  $D_2$ , 根据上述分析可得:

$$D_1 = \frac{1}{2}(1 \times p^*) + \frac{1}{2}(1 \times q^*) = \frac{1}{2} \left( \frac{\frac{\delta_t}{\Delta v_t - c_t + \alpha\mu - \beta\gamma}}{\Delta v_t + c_t - \beta k_t + \beta\gamma} \right) \quad (3)$$

$$D_2 = 1 - D_1 = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_t}{\Delta v_t - c_t + \alpha\mu - \beta\gamma} + \frac{\delta_l}{\Delta v_l + c_l - \beta k_t + \beta\gamma} \right) \quad (4)$$

由演化相位图可以看出，当两者博弈的决策落在右侧 UMVO 时，演化博弈会向(1,1)点演化，反之则向(0,0)演化。因此，双方选择合作的概率与  $D_2$  成正比，与  $D_1$  成反比。

### 3.2 灵敏度分析

根据式(3)和式(4)以及模型假设分析不同参数对  $D_1$  与  $D_2$  的影响，得到参数灵敏度分析，如表 5 所示。

由表 5 可知，随着  $\Delta v_l$ 、 $\Delta v_t$  的增大， $D_1$  逐渐减小， $D_2$  逐渐增大，即系统收敛于  $O$  点的概率越小，收敛于  $W$  的概率越大。

表 5 演化博弈模型相关参数的灵敏度分析

	$\Delta v_l$	$\Delta v_t$	$c_l$	$c_t$	$\delta_l$	$\delta_t$	$\alpha$	$k_l$	$\mu$	$\beta$	$k_t$	$\gamma$
$D_1$	-	-	-	+	+	+	-	/	-	+	+	±
$D_2$	+	+	+	-	-	-	+	/	+	-	-	∓
合作概率	+	+	+	-	-	-	+	/	+	-	-	∓

注：+/-表示函数参数的增大而增大/减小；∓表示  $D_2$  随着参数  $\gamma$  先减小后增大。

当实验室与第三方达成合作后的潜在收益越大，即双方对于合作的阻碍越小，两者趋向合作演化的概率越大，这意味着第三方应该提高回收处理业务的服务质量，实验室应遵守合作协议。因此，对于高校实验室而言，选择高质量的第三方企业不仅能有效解决高校实验室废弃物处理问题，还能保持与第三方企业稳定的合作关系，从而避免实验室废弃物出现处理不及时的问题。

随着  $c_l$ 、 $c_t$  的增大， $D_1$  逐渐减小， $D_2$  逐渐增大，即系统收敛于  $O$  点的概率越小，收敛于  $F$  点的概率越大；随着  $c_t$  的增大， $D_1$  逐渐增大， $D_2$  逐渐减小，即系统收敛于  $O$  点的概率越大，收敛于  $W$  点的概率越小。当实验室自建处理设备的费用越大，第三方回收处理的运营成本越小，则双方趋向合作演化的概率越大。因此，对于部分没有能力自建处理设备的高校而言，往往选择第三方企业来进行废弃物处理，而第三方应提高专业化服务水平来减少其运营成本，增加与高校实验室合作的机会。

随着  $\delta_l$ 、 $\delta_t$  的增大， $D_1$  逐渐减小， $D_2$  逐渐增大，即系统收敛于  $O$  点的概率越小，收敛于  $F$  点的概率越大。当双方达成合作的机会成本和转移成本越大，则合作意愿越低，此时双方向竞争演化的概率越大。因此，第三方应提高专业化的服务能力来增强实验室承担合作机会成本的意愿，还应充分利用高校实验室平台来宣传自身专业化服务水平的能力，减少自身合作转移成本；实验室也应认真评估第三方的专业资格履历，降低与其合作产生的风险概率。

当  $\alpha$ 、 $\mu$  越大， $D_1$  越小， $D_2$  越大，系统趋向收敛于  $W$  点。当实验室废弃物数量超标率过高，实验室需要承担大量环境治理的成本，而第三方处理能收获更多的额外收益，此时双方趋向合作演化的概率越大。当  $\beta$ 、 $k_t$  越大， $D_1$  越大， $D_2$  越小，系统趋向收敛于  $O$  点。当第三方回收商处理不及时的概率越大，实验室因其不及时处理产生的环境成本越大，双方趋向合作演化的概率越小。因此，对于没有自处理废弃物能力的高校而言，实验室需要严格控制其产生废弃物的数量，同时也应认真评估第三方处理废弃物的能力，避免处理不及时的废弃物在校内产生巨额环境治理成本；第三方应该建立充足的废弃物额外处理能力，能及时处理实验室超额产生的废弃物，避免处理不及时而产生的额外成本影响与高校的合作。实验室和第三方双方也应建立相应奖惩机制，促使双方在不稳定的情况下向合作趋势的演化。

由表 5 可知， $D_1$  随着  $\gamma$  先增大后减小， $D_2$  随着  $\gamma$  先减小后增大。由此可见  $\gamma$  存在着一个最佳取值能够使双方趋向合作演化的概率达到最大，即实验室与第三方之间存在一个最优惩罚机制。

实验室与第三方基于竞合演化动态均衡的最优惩罚机制为：

$$\gamma = \frac{\sqrt{\delta_l}(\Delta v_t - c_t + \alpha\mu) - \sqrt{\delta_t}(\Delta v_l + c_l - \beta k_t)}{\beta \sqrt{\delta_t + \delta_l}} \quad (5)$$

### 4 数值分析

为了直观地分析和比较上述结果，我们通过数值算例来进一步分析。设  $\delta_l = 80$ ， $\Delta v_l = 550$ ，

$\Delta v_t = 480$ ,  $c_1 = 160$ ,  $c_t = 120$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $\mu = 120$ ,  $\beta = 0.4$ , 以上取值符合模型假设及前提条件。

为分析最优惩罚机制,令 $\gamma$ 的取值为0~300,仿真结果如图2所示。随着回收不及时惩罚因子 $\gamma$ 增加,双方合作概率先增大后减小,即当 $\gamma = 200$ 时,双方向合作演化的概率最大。

为分析实验室废弃物超标和第三方处理不及时对双方合作概率的复合影响,进行了 $D_2$ 关于 $\alpha$ 和 $\beta$ 的数值仿真,结果如图3所示。当实验室排放废弃物超标概率越高,即第三方有更大的概率获得回收处理业务,第三方废弃物处理越及时,即第三方提供的服务水平越高,自然双方的合作概率就越大。当实验室废弃物超标概率处于较高水平时,第三方服务水平对双方合作概率的影响相对越小,即越高水平的实验室对于第三方服务水平有越高的要求。

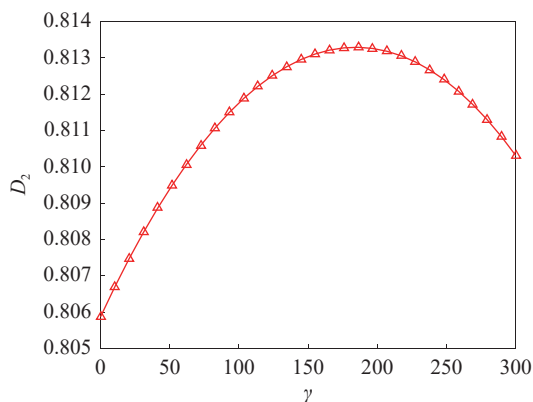


图2 惩罚因子 $\gamma$ 对合作概率 $D_2$ 的影响曲线图

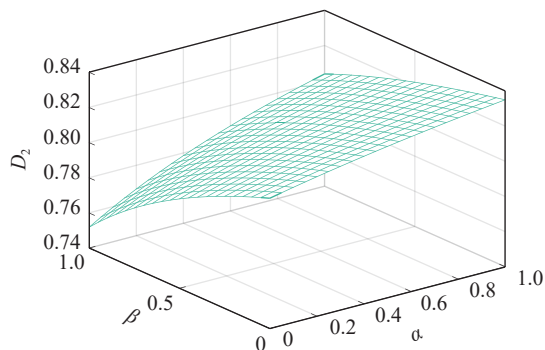


图3 实验室废弃物超标概率 $\alpha$ 和第三方处理不及时概率 $\beta$ 对合作概率 $D_2$ 的影响曲线图

## 5 结束语

本文探讨高校实验室废弃物处理策略的选择,构建了一个实验室与第三方回收商组成的演

化博弈模型,研究了实验室与第三方之间的合作与竞争关系,并分析了其回收策略的演化机制。该模型的纯策略纳什均衡表明了完全竞争(都不合作)或完全合作是两者的均衡策略。

研究发现,双方达成合作是实验室与第三方提高收益的最佳选择,实验室能转移自建设备的大量成本,第三方也能获得更多的回收处理收益;由于实验室或第三方会存在排放超标、不遵守合约、运营能力不足等问题,所以从长远看,两者之间会出现合作和不合作交替呈现的情形;实验室与第三方合作后需建立一个合适的惩罚机制,促使第三方及时履行合约并使两者在不稳定状态时向合作趋势演化。

实验室应该在采取合作策略前认真评估第三方的专业资格履历与运营能力,第三方也应提高运营管理能力以增强实验室承担合作成本的意愿,避免实验室废弃物处理不及时。第三方回收商还应充分利用实验室的资源,如利用高校实验室的平台与其他高校进行合作回收废弃物以减少其合作转移成本。

## 参考文献

- [1] 董其格其,姚全福. 高校生物实验室废弃物分类处理研究与实践[J]. 现代职业教育, 2020(40): 126-127.
- [2] 李冰洋,黄开胜,艾德生,等. 实验室废弃物安全管理思考与实践[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(10): 222-225.
- [3] 赵晟博,王振兴,吕宝刚. 高校实验室危险废弃物安全管理研究[J]. 实验室科学, 2022, 25(3): 217-220.
- [4] 王莎莎. 制造企业逆向供应链演化稳定策略研究[D]. 合肥工业大学, 2019.
- [5] 白玲,徐雷,王崑. 基于演化博弈模型的职称政策与实验技术人员合作意愿研究[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(7): 244-247.
- [6] 宁浩男,高崎,陈玉昆. 基于博弈论与云物元分析的高校实验室文化建设评价[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(12): 251-255.
- [7] 傅志刚,潘蕾,王峥,等. 浙江省高校实验室危险废弃物处置现状与对策研究[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(9): 241-245.
- [8] 吴丹,江轶,艾德生,等. 高校生物废弃物处理平台建设与管理探究[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(10): 233-236.
- [9] 莎日娜,叶剑新,唐俊峰. 校院两级管理体制下加强高校实验室废弃物处置管理的思考[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(5): 267-269.

(下转第155页)