



中国环境科学
China Environmental Science
ISSN 1000-6923, CN 11-2201/X

《中国环境科学》网络首发论文

题目：农村生活垃圾分类治理的奖惩激励机制研究——基于复杂网络演化博弈模型
作者：魏夕凯，马本
DOI：10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220329.006
收稿日期：2022-01-17
网络首发日期：2022-03-31
引用格式：魏夕凯，马本. 农村生活垃圾分类治理的奖惩激励机制研究——基于复杂网络演化博弈模型[J/OL]. 中国环境科学.
<https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220329.006>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

农村生活垃圾分类治理的奖惩激励机制研究

——基于复杂网络演化博弈模型

魏夕凯,马本*(中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要: 充分考虑农村“熟人社会”特点,本文首次采用复杂网络演化博弈模型,通过数值仿真分析了声誉损失和奖励政策对农户垃圾分类行为扩散深度的动态影响.结果表明:政府不干预时,垃圾分类将无法在农村自发持续而普遍推广;在一定范围内提高声誉损失或奖励均可显著促进农户分类;仅依靠单一政策,无法实现分类的深度扩散,若依靠声誉损失与奖励相互配合,可实现低政策强度、高扩散深度的合意效果;搭便车收益的提高会抑制垃圾分类扩散深度;注重经验学习和适应能力的 EWA 学习策略更有助于促进垃圾分类扩散.上述结论广泛适用于分类初始状态、学习能力、人口规模不同的农村,对中国农村垃圾分类具有普遍性的启发意义.最后,本文提出了充分利用“熟人社会”优势构建与农村社会经济特征相契合的垃圾分类激励政策建议.

关键词: 农村;垃圾分类;熟人社会;奖惩激励;复杂网络演化博弈

中图分类号: F062 文献标识码: A

Reward and punishment incentive mechanism of domestic waste classification in rural China: Based on complex network evolutionary game model. WEI Xikai, MA Ben (School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Based on the characteristics of rural "acquaintance society", this paper adopts the complex network evolutionary game model for the first time to analyze the dynamic impact of reputation loss and reward policy on the diffusion depth of farmers' waste classification behavior through numerical simulation. The results show that, when the government does not intervene, garbage classification will not be able to be spontaneously, continuously and widely popularized in rural areas. Within a certain range, improving reputation loss or reward can significantly promote the classification of farmers. Only relying on a single policy cannot achieve deep diffusion for classification. If we rely on the cooperation of reputation loss and reward, desirable effect can be achieved with low policy intensity but high diffusion depth. The increase of free rider income will inhibit the diffusion depth of waste classification. EWA learning strategy focusing on experience learning and adaptability is more helpful to promote the diffusion of waste classification. The above conclusions are comprehensively applicable to rural areas with different initial classification state, learning abilities and population sizes, and have universal implication significance for rural waste classification in China. Finally, this paper puts forward the choice of waste classification incentive policy by fully taking the advantages of "acquaintance society" and building a waste classification incentive policy consistent with the socio-economic characteristics of rural areas.

Key words: rural areas; refuse classification; acquaintance society; reward and punishment incentive; evolutionary game in complex network

随着农村经济发展和生活水平提高,农村垃圾总量增多、结构复杂、难降解^[1].由于农村垃圾处置面临规模不经济^[2]、政府监管成本高^[1]、农户环保意识淡薄^[1]等制约,生活垃圾污染日益严重.在农村推行垃圾分类是集中处置的重要前提,也是改善农村人居环境、促进低碳发展的重要举措^[2].中央已颁布多项农村生活垃圾处理政策^[3],2021年和2022年一号文件要求开展农村生活垃圾就地分类与源头减

量试点^[4,4].研究契合中国农村特点的农户生活垃圾分类激励机制极具现实意义.

农村的社会基础和垃圾分类处理特点与城市迥异,不能照搬城市模式^[4,5].农村地域广阔、农户居住密度低,导致垃圾分类的收集、监督、运输成本高,难以形成垃圾处理的规模经济效应,且不适用于城市社区强制分类措施^[6-8].农户收入较低、分类意识薄弱,垃圾处理收费难度大,政府激励政策缺失,严重

收稿日期: 2022-01-17

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(72103194)

* 责任作者,副教授,maben@ruc.edu.cn

制约农村垃圾分类工作持续推进^[9].但农村垃圾分类治理较城市也具有一定潜在优势.特别是,中国乡土社会是由关系网络和乡规民约连接而成的"熟人社会"^[10]."熟人社会"中农户的行为具有较强互相影响的网络特性^[11],且地方性社会规范对农户行为的约束作用不可忽视.因此,农村垃圾分类政策的制定须与"熟人社会"等特点紧密结合,通过合理的激励政策将具有外部性的垃圾分类行为内部化,从源头解决生活垃圾分类处理问题.

本文以"熟人社会"为切入点,首次尝试基于复杂网络演化博弈模型,通过数值模拟和典型案例相结合的方法,分析声誉损失和奖励政策对农户垃圾分类行为扩散深度的动态影响,提出充分利用"熟人社会"优势构建与农村社会经济特征相契合的垃圾分类激励政策.

1 文献综述

随着农村生活垃圾污染问题突出,各地因地制宜探索农村生活垃圾分类处理模式,包括村民自主供给、政府供给等模式^[2].如,北京北沟村实行农户分类、公司收集、村两委监督的村民自主供给模式,成本低、效率高^[2].浙江金华实行"两次四分法",由农户初步分成"会烂"、"不会烂",再由分拣员细分、回收^[12].不论采取何种模式,农户源头分类习惯养成对降低成本、提升可持续性、形成分类处置长效机制至关重要.为调动农户自主分类积极性,部分农村实行垃圾分类奖励制度.如,浙江贺田村实行计分激励制度,根据每户的垃圾分类情况给予相应奖励^[13];安徽歙县通过设立垃圾兑换商品的生态美超市,赋予农户经济激励^[14].

现有文献在分析农户垃圾分类行为时,大多将农户作为独立个体,忽略了农村社会固有的"熟人社会"特点及其影响.中国的乡土社会是一个以亲情、友情为纽带,由面子、关系网络和乡规民约连接而成的"熟人社会"^[10].在传统文化与现代农业合作社制度的共同影响下,乡规民约、地缘意识等令农村具有一定的封闭性、集体性,使"熟人社会"观念根植于农户的行为逻辑,对其行动影响较大^[15].虽然随着城镇化发展,大量青壮年劳动力外流,农村体现出"半熟人社会"^[16,17]、"无主体熟人社会"^[18]特征,但相较城市陌生人社会,仍保留部分集体行动特征和较强的人

情关系、面子观念^[4],因此"熟人社会"对农户垃圾分类行为的影响有待深入考察.

在农村"熟人社会"中,社会环境相对封闭,乡规民约、熟人关系网、面子观念的影响更明显,农户追求长期利益的动机更强^[19].声誉损失可有效增强农户行为的可预见性^[11],从而抑制污染物废弃行为,促进农户垃圾分类^[20].目前,少数村庄成功引入声誉损失机制,成效显著.如,浙江陆家嘴通过党员、妇女代表等熟人劝导、帮助不分类农户,对每户分类情况公开评比等,利用声誉损失给不分类农户带来较大的社会关系压力^[4,21].

在影响机制方面,由于农村"熟人社会"中农户通过家族、友情等相互联系,使同村个体行为呈现较强的网络特性^[11].在对待公共问题的行为、态度上,农户常会通过与其他农户的一致性获得集体认同感与归属感^[22-24],表现为"熟人社会"中农户的决策过程相互影响.同时,垃圾分类政策的实施使农户决策过程具有重复博弈性质,使奖惩机制的激励效果与一次博弈差异较大^[25].因此,农户的总收益既包含与其他农户博弈的直接累积收益,又包含由网络中选择相同策略的农户带来的网络外部性收益.综上,农村"熟人社会"是一个由大量农户通过个体之间不断地博弈、模仿、学习,在寻找收益最大化策略过程中形成的复杂网络.

针对参与人有限理性和重复博弈的特点,使用演化博弈可对农村"熟人社会"中农户的行为做出准确预测^[26].然而,传统的演化博弈假定所有个体以均匀混合的方式随机联系,忽略了当今"熟人社会"中农户之间的联系是基于特定关系而非完全随机的特点^[27].因此,本文使用复杂网络演化博弈模型,首次从农村"熟人社会"角度探究农户生活垃圾分类行为的决策过程,并探究声誉损失和奖励两种激励政策对垃圾分类在农村扩散深度的影响.与现有文献相比,本文考虑了农村"熟人社会"中农户垃圾分类行为决策过程相互影响的特点,以及网络外部性对农户行为的影响.由于生活垃圾分类政策出台时间不长,探究政策强度对生活垃圾分类行为影响的文献较少,而现有的少数研究未能有效回答政策强度变化对农户生活垃圾分类行为的影响,本文通过数值仿真弥补了以上不足.

2 模型设定

模型设定的研究框架如图 1 所示.首先,构建演化博弈模型,提出基本假设,并将声誉损失和奖励纳入农户的收益函数;其次,构建 NW 小世界网络模型模拟农村"熟人社会"中农户之间的博弈关系;最后,设定农户博弈的策略更新规则.

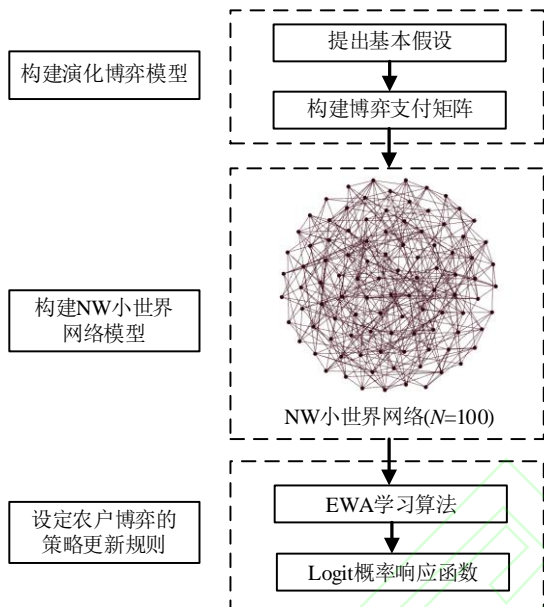


图 1 研究框架

Fig.1 Analytical framework

2.1 演化博弈模型

博弈的三个基本要素是:参与者、策略、支付.演化博弈模型^[28,29]中,参与者分别为农村"熟人社会"中的任意两位农户,农户 i 、农户 j ;二者的策略集均为(垃圾分类,垃圾不分类);基于现实案例、已有研究和公共品理论,对参与者的支付提出如下基本假设:

首先,提出演化博弈的第 1 个基本假设:

H1:若农户垃圾分类,会产生分类成本 C .

农户在分类之前需要耗费大量时间、精力学习生活垃圾分类的相关知识.并且,农村生活垃圾的成分复杂,农户的分类意识总体淡薄,若每天都按要求完成分类投放将占用较多时间、精力,使农户对垃圾分类产生抵触情绪^[30,31].因此,农户分类时会产生不可忽视的时间成本和机会成本^[32,33].

其次,提出第 2 个基本假设:

H2:若农户垃圾分类,可获得来自政府的奖励 R .由于农户普遍收入水平较低,通过罚款倒逼农

户分类极有可能引发农户的不满与抵触情绪,导致垃圾分类在农村推广失败.为充分提高农户垃圾分类的参与意愿和程度,本文假定政府可对已分类的农户给予一定的物质或精神奖励,并可根据分类情况调整奖励价值.比如,安徽歙县设立生活垃圾分类积分兑换的生态美超市,以乡镇干部、村干部等地方精英为主要发起者,带动农户垃圾分类^[14];浙江陆家村施行党员联系户制度,每月对"党员+农户"的垃圾分类小组整体和个体分别打分公示,对评分高的农户授予"垃圾分类小能手"、"美丽家庭户"等荣誉称号,并在每户家门口的标识栏公示,辅以一定的经济奖励^[4,21];安徽铜陵市合兴村的每家垃圾桶上贴有包含户主信息的二维码,保洁员对其分类情况打分,分数高的农户可在村庄美德银行换购生活用品,并在村内评优时优先考虑分数高的农户^[7].上述地区实行激励政策以来,生活垃圾总量显著减少,生态环境明显改善.

然后,提出第 3、4 个基本假设:

H3:若农户单方面垃圾不分类,会面临周围垃圾分类的农户的批评、指责,给自身带来声誉损失 L .

H4:若农户双方均垃圾不分类,则不会带来声誉损失.

在农村"熟人社会"中,乡规民约、社会规范、面子观念在农户的日常行为准则中发挥重要作用,个别违反乡规民约的农户会受到他人指责,承担较大的社会压力,带来声誉损失^[15,20].因此,政府可利用"熟人社会"的声誉损失机制有效促进农户垃圾分类,并通过相应措施调节声誉损失强度^[4,7,21,34],包括:(1)将垃圾分类编入村民文娱活动,提高垃圾分类在村中的热度;(2)将垃圾分类纳入乡规民约,并建立农村公共舆论,使农户相互监督;(3)对农户分类情况量化排名,并设置荣辱榜公示,对不分类农户采取警告、严重批评等不同程度的通报批评;(4)依靠村干部、组长或已分类的好友、邻居等"熟人"对不分类农户反复上门劝告、批评、指导;(5)将不分类农户纳入失信人员名单,并取消农村合作医疗、评优资格等.部分农村采取上述措施并取得显著成效.比如,陆家村实行"村民分类,专人收集",由于垃圾收集员为本村村民,多数农户碍于情面会规范分类,否则将被收集员劝说;同时,设立垃圾分类荣辱榜,每月评出先进农户和落后农户并公示^[4,21].合兴村村干部对垃圾分类

分数低的农户上门劝告、批评教育^[7].

最后,提出第 5 个基本假设:

H5:若农户单方面垃圾不分类,则会从周围垃圾分类的农户行为中获得搭便车收益 Q .

垃圾分类可改善农村环境,给全体农户带来健康、收入、幸福感等多方面的综合提升^[2,35],具有较强的公共物品属性和正外部性,为部分农户的搭便车行为创造了条件^[36].理性的农户为追求个人收益最大化,会通过不分类的"搭便车"行为,从周围已分类的农户行为中"坐享其成",使农户的实际行为与农村的集体行动目标背离,导致农村环境质量陷入加剧恶化的"囚徒困境"^[37].

根据 H1~H5,构建农户间生活垃圾分类行为的博弈支付矩阵,见表 1.

表1 博弈支付矩阵
Table 1 Payoff matrix

		农户 j	
		垃圾分类	垃圾不分类
农户 i	垃圾分类	$R-C, R-C$	$R-C, Q-L$
	垃圾不分类	$Q-L, R-C$	$0, 0$

2.2 NW 小世界网络

虽然"熟人社会"中农户彼此较为熟悉,但在公共品供给等重要问题的决策时,农户更易观察到日常联系最密切的少部分农户的行为,并将其作为行为决策的主要参考^[16,17,20].小世界网络的特性指一些彼此关系不紧密的个体可通过一条很短的熟人链条被联系在一起.根据复杂网络理论^[38,39],小世界网络的初始状态中每个节点与其临近的 w 个节点连边,在此基础上,Watts-Strogatz(WS)小世界网络以一定的概率随机断开并重新连接各边,但这破坏了网络原有的连通性,而Newman-Watts(NW)小世界网络在不改变网络节点原有关系的基础上,通过随机加边机制增强了网络的连通性.因此,NW 小世界网络可更贴切地模拟"熟人社会"中农户间生活垃圾分类行为决策的演化博弈关系.

基于此,构建农村"熟人社会"垃圾分类扩散网络 $G = (V, E)$,其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示网络中所有节点的集合,每个节点代表一位农户, E 表示所有节点之间边的集合,代表所有农户间的直接人际关系,表达式为:

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1N} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{N1} & e_{N2} & \cdots & e_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, e_{ij} 取值为 1 表示节点 v_i 和 v_j 之间存在直接人际关系,取值为 0 则表示不存在.特别地,任何点都不能与自身相连,即 $e_{ii} = 0$.假定每位农户都与 w 位相邻的农户存在直接人际关系,即表示农户间固有的熟人关系,并根据 NW 小世界网络特性,农户在每期都会以概率 γ 与任一非相邻农户重新建立新的直接人际关系,从而形成由熟人链条连接的间接熟人关系.随机加边概率 γ 越高,农户间直接、间接熟人关系越多,农村熟人社会程度越高.

2.3 EWA 学习算法

每期博弈中,农户 i 和所有相邻农户博弈并获得累积收益,然后随机选择一位相邻农户进行收益比较,若对方收益高于自己,则下期博弈将以一定的概率模仿其当期策略.由于农户是具有适应和学习能力的异质性独立个体,可根据过去博弈的策略、收益及时调整下期策略.因此,农户的策略更新规则使用综合考虑过去经验和信息学习的经验加权吸引力(Experience weighted attraction, EWA)学习算法计算,即 EWA 定义了一个衡量策略吸引力的中间过程,用于更新农户每期选择各个策略的概率^[40-42].

EWA 中选择策略 k 的概率取决于吸引力指数 A .首先,计算第 t 期策略 k 对农户 i 的吸引力指数 A ,即:

$$A_i^k(t) = \frac{\varphi \cdot N(t-1) \cdot A_i^k(t-1) + \pi_i(s_i^k, s_{-i}(t))}{N(t)} \quad (2)$$

式中, φ 表示上期吸引力指数的贴现系数,取值越大则上期吸引力指数对当期影响越大; $N(t)$ 表示第 t 期的经验权重,每期根据上期权重修正,即:

$$N(t) = \rho \cdot N(t-1) + 1 \quad (t \geq 1) \quad (3)$$

其中, ρ 表示上期经验权重的贴现系数^[43]. $\pi_i(s_i^k, s_{-i}(t))$ 表示农户 i 选择策略 k 的期望收益,即:

$$\pi_i(s_i^k, s_{-i}(t)) = r_i^k + v(e_i^k(t)) \quad (4)$$

其中, r_i^k 表示农户 i 和所有相邻农户博弈获得的累积收益, $v(e_i^k(t))$ 表示网络中同样选择策略 k 的农户带来的网络外部性收益,即:

$$v(e_i^k(t)) = \sum_{k=1}^m \theta_k e_i^k(t)^{1/\beta} \quad (\beta > 1) \quad (5)$$

其中, m 表示农户 i 可选策略的个数; θ_k 表示策略 k 的网络效应参数, 反应网络外部性的程度; β 表示网络效应指数, 取值外生给定, 需满足大于 1 以保证 $v(e_i^k(t))$ 的二阶导数小于零^[25,43,44]; $e_i^k(t)$ 是农户 i 对第 t 期网络中同样选择策略 k 的农户的预期数目, 更新方法为:

$$e_i^k(t) = (1 - \varepsilon) \cdot e_i^k(t-1) + \varepsilon \cdot q_i^k(t-1) \quad (6)$$

其中, ε 为期望调整因子, 取值越大则上期选择策略 k 的农户预期数目在当期占比越大; $q_i^k(t-1)$ 为上期选择策略 k 的农户实际数目。

然后, 使用 Logit 概率响应函数将策略 k 的吸引力指数 A 转化为农户 i 下期选择策略 k 的概率 P_i^k ^[42], 即:

$$P_i^k(t+1) = \frac{e^{\lambda A_i^k(t)}}{\sum_{k=1}^m e^{\lambda A_i^k(t)}} \quad (7)$$

式中, λ 表示吸引力指数的敏感程度, 其倒数的含义为决策噪声, 用于判断决策者的理性程度, 取值越高则噪声越小, 决策者的理性程度越高^[41]。

3 结果与讨论

3.1 仿真步骤与初始值设置

基于模型设定, 将 NW 小世界网络上第 t 期农户演化博弈过程分为以下 6 个步骤。

步骤 1: $t=0$ 时, 生成 N 位农户的 NW 小世界网络, 每位农户都与 w 位相邻农户连边, 按网络中选择“垃圾分类”农户的初始比例 p 随机分配各农户的初始策略, 每位农户的 $N(0)$ 和 $A(0)$ 分别为取值范围 $[1, 2]$ 和 $[1, 3]$ 的随机数^[41]。

步骤 2: $t=1$ 时, 每位农户以概率 γ 与任一非相邻农户建立新联系, 并按 EWA 学习算法调整下期策略。

步骤 3: $t=2$ 时, 每位农户断开上期的新连接, 再以概率 γ 与非相邻农户建立新联系, 并按 EWA 学习算法选择下期策略。

步骤 4: 重复步骤 3, 直到 $t=100$ 。

步骤 5: 对步骤 1~4 重复模拟 20 次, 以减少随机过程造成的误差, 确保仿真结果具有一定的稳健性。

步骤 6: 在每次重复模拟中, 对第 90~100 期网络

中已分类农户的比例求平均数, 以得到不同政策强度下的扩散深度。

为直观展示农户博弈的演化过程, 利用 MATLAB R2021b 分别对不同情形下声誉损失、奖励对垃圾分类扩散深度的影响进行仿真。为不失一般性, 结合相关文献^[45], 设置参数初始值, 见表 2。

表2 参数初始值设置

Table 2 Parameter initial value setting

参数	N	w	γ	p	β	P	θ_k	φ	ε	λ
初始值	100	4	0.2	0.3	2	0.5	5	0.5	0.5	5

3.2 声誉损失和奖励对扩散深度的影响

声誉损失和奖励影响扩散深度的数值仿真结果见图 2。图 2(a) 展示了当 $p=0.3, C=10, Q=0, R$ 依次取 0、5、10、15、20 时, 不同声誉损失对应的扩散深度。当政府不干预, 即 $L=0, R=0$ 时, 经过 100 期博弈后, 扩散深度不足 0.05, 说明实现垃圾分类扩散需要政策干预。当 C, Q, R 固定时, 随声誉损失增加, 扩散深度先增加, 后趋于稳定, 即边际作用先递增后递减。可能的原因是, 声誉损失对农户的激励作用存在“X 负效率”。一方面, 由于政府依声誉损失倒逼农户分类的目标, 未充分考虑分类成本、搭便车收益等因素, 与农户实现个人收益最大化的目标不一致, 导致激励不相容, 从而使高强度声誉损失的作用降低^[46]。另一方面, 受生活习惯、非理性程度影响, 部分农户分类行为的努力程度和效用程度呈“倒 U 型”关系, 即存在一段无论努力程度大小, 效用程度均不变的“惰性区域”^[47]。因此, 适当提高声誉损失强度, 农户会通过选择分类获得收益, 但当强度超过农户体能、心理承受能力的极限后, 选择任一策略的收益均不会增加, 因此未分类农户没有改变策略的动力^[48]。

奖励 R 由 0 提高至 15, 相同声誉损失对应的扩散深度增加, 表明提高奖励可促进农户分类; 而 R 由 15 提高至 20 时, 扩散深度无明显变化, 可能的原因是奖励同样存在边际作用递减。说明在一定范围内提高奖励可显著促进农户自觉分类。当 $R=0$ 时, 即仅存在声誉损失、不存在奖励时, 声誉损失提高至 50, 扩散深度只增加至 0.5; 而当 $L=0$ 时, 即仅存在奖励、不存在声誉损失时, 奖励提高至 20, 扩散深度只增加至 0.4, 效果较差。这表明, 仅靠单一政策激励, 即便强

度较高,扩散深度也较低;需要正向和负向激励相配合,方可实现高程度扩散.该结论与基于 822 份农户调研样本的实证结果一致^[49],即"奖励+处罚"的奖惩组合方式更有助于农村生活垃圾处理.

图 2(b)展示了当 $C=10, Q=10, R$ 依次取 0、5、10、15、20 时,不同声誉损失对应的扩散深度.可见,图 2(a)

中的结论依然成立.对比图 2(a),当 C, R 固定时,相同声誉损失在 $Q=10$ 对应的扩散深度更低,说明提高搭便车收益会抑制扩散.因为搭便车收益较强时,虽然声誉损失可产生正向激励,但强度较低,不足以改变农户的行为.

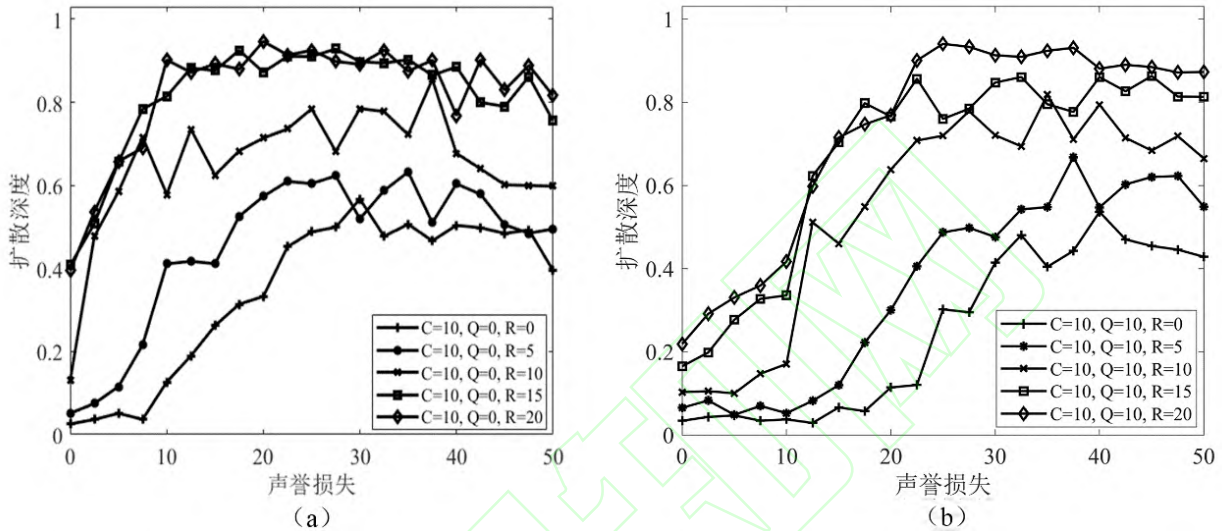


图 2 声誉损失和奖励影响扩散深度的数值仿真

Fig.2 Numerical simulation of reputation loss and reward impact diffusion depth

3.3 敏感性分析

3.3.1 初始比例 为检验初始比例改变对上述结论的影响,分别对 p 取 0.3、0.6 时数值仿真,结果如图 3.可见,初始比例增加,上文结论依然成立,并且初始比例较高时,相同声誉损失或奖励对应的扩散效果更好.

3.3.2 熟人社会程度 为检验熟人社会程度对结论的影响,分别对随机加边概率 γ 取 0.1、0.2 时仿真,见图 4.在不同熟人社会程度中,上文结论仍成立.并且,熟人社会程度越高,声誉损失和奖励的政策效果越好.

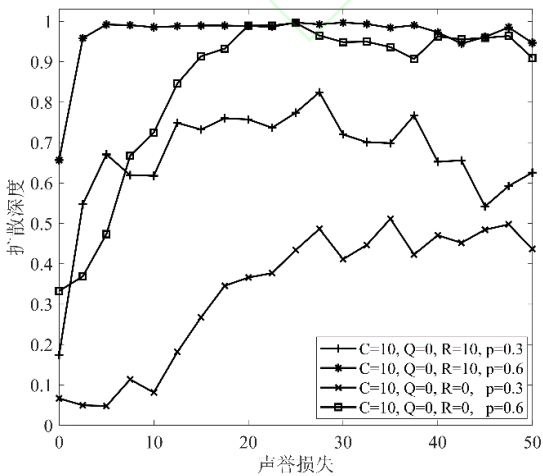


图 3 初始比例的敏感性分析

Fig.3 Sensitivity analysis of initial proportion

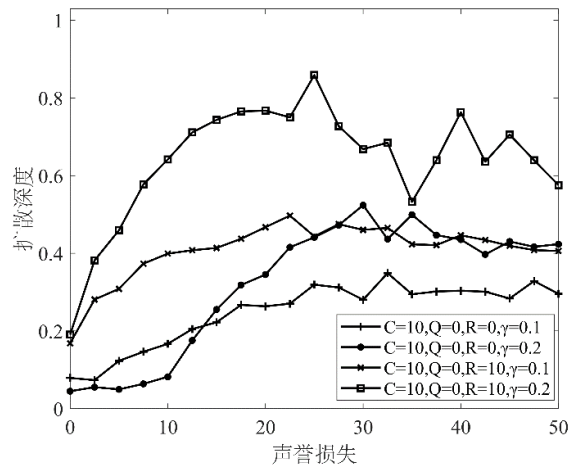


图 4 熟人社会程度的敏感性分析

Fig.4 Sensitivity analysis of degree of acquaintance society

3.3.3 网络规模 为检验网络规模大小对结论的影响,分别对 N 取 100、200、400 数值仿真,见图 5. 上文结论仍成立.并且,网络规模对政策效果影响较小.因此,相同政策在不同规模的村庄取得的效果相似.

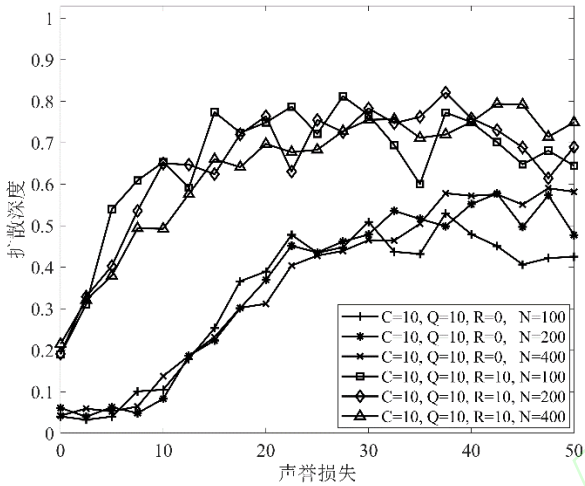


图 5 网络规模的敏感性分析

Fig.5 Sensitivity analysis of network scale

3.3.4 EWA 学习算法参数 为检验 EWA 学习算法的参数改变对结论的影响,按表 3 设置 7 种参数初始值情形.其中,情形 1 为上文使用的基准情形,作为对照组,即其余情形为基于情形 1 改变某一参数

的初始值.情形 2 考察吸引力指数的敏感程度 λ 增大,即农户决策时噪声降低对结论的影响.情形 3 考察上期经验权重的贴现系数 ρ 增大,即上期经验在当期影响程度变大的影响.情形 4 考察上期吸引力指数的折现因子 φ 减小,即上期吸引力指数在当期影响程度降低的影响.情形 5 考察网络效应参数 θ_k 减小,即网络外部性的程度降低的影响.情形 6 考察外生的网络效应指数 β 增大的影响.情形 7 考察期望调整因子 ε 减小,即上期选择策略 k 的实际数目在当期预期数目中比重降低的影响.

表3 EWA学习算法参数设置

Table 3 Parameter setting of EWA learning algorithm

参数情形	C	Q	λ	ρ	φ	θ_k	β	ε
情形 1	10	0	5	0.5	0.5	5	2	0.5
情形 2	10	0	10	0.5	0.5	5	2	0.5
情形 3	10	0	5	0.8	0.5	5	2	0.5
情形 4	10	0	5	0.5	0.1	5	2	0.5
情形 5	10	0	5	0.5	0.5	1	2	0.5
情形 6	10	0	5	0.5	0.5	5	5	0.5
情形 7	10	0	5	0.5	0.5	5	2	0.1

7 种情形在 $R=0$ 或 10 时的数值仿真结果见图 6.可见,情形 2~6 的扩散深度均在情形 1 附近波动,说明改变 EWA 学习算法参数改变对上述结论影响不明显.

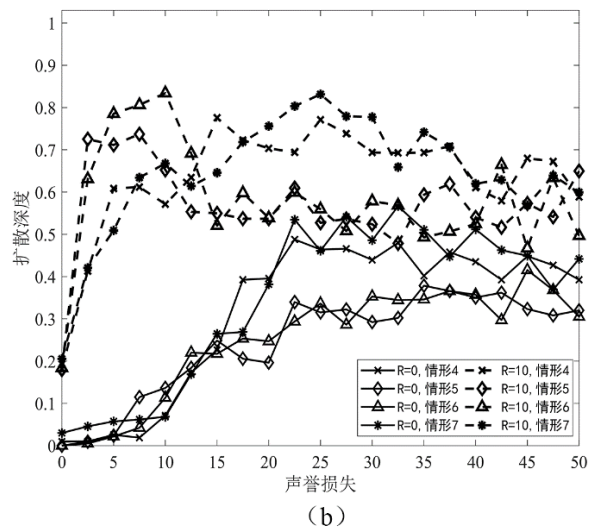
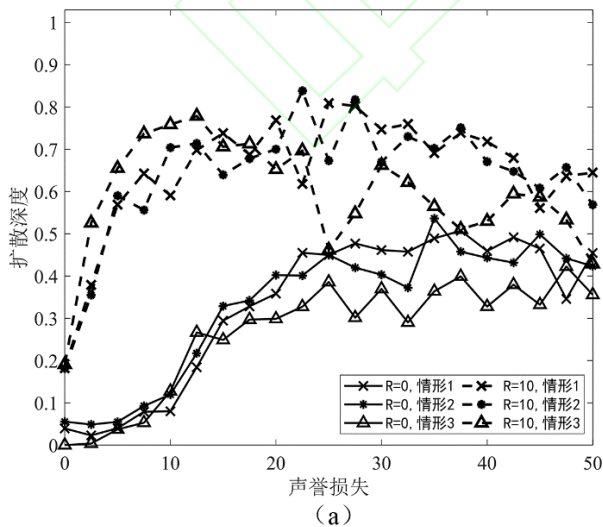


图 6 EWA 学习算法参数的敏感性分析

Fig.6 Sensitivity analysis of EWA learning algorithm parameters

3.3.5 策略更新规则 考虑到农户学习、适应能力有限,或受制于村中垃圾分类信息更新滞后、公布渠道不完善,不能有效观察到网络中所有农户历史选择,而仅根据当期相邻农户的策略收益选择下期策略,因此策略更新规则的选择可能会影响仿真结果[25,50,51].为检验上述结论是否具有稳健性,使用 Fermi-Dirac 分布函数替代 EWA 学习算法进行数值仿真[52,53].其含义是,每期博弈结束后,农户 i 随机选择一位相邻农户 j 进行收益比较,并计算模仿农户 j 当期策略的概率 P ,若 P 大于 0.5 则选择模仿,否则不改变原策略.Fermi-Dirac 函数如下:

$$P_i^{S_i \rightarrow S_j}(t+1) = \frac{1}{1 + e^{[r_i(t) - r_j(t)]/K}} \quad (8)$$

式中, S_i 、 S_j 分别表示农户 i 、农户 j 当期策略, $r_i(t)$ 、 $r_j(t)$ 分别表示农户 i 、农户 j 当期博弈的直接收益, K 表示环境干扰因素,反映了农户 i 在策略更新中的非理性程度,取值越大代表农户处于干扰较大的环境中,无法做出理性决策.

仿真结果如图 7.结果表明,更换策略更新规则后结论仍成立,但 EWA 学习算法的扩散深度更高,说明注重经验学习和适应能力的 EWA 学习算法比只注重当期收益的 Fermi-Dirac 函数更有效率.因此,村委会应及时记录并公布已分类、未分类的农户数量及奖惩情况,增加垃圾分类信息的持续性、透明度,

以便农户充分掌握村中垃圾分类进展并及时调整策略.

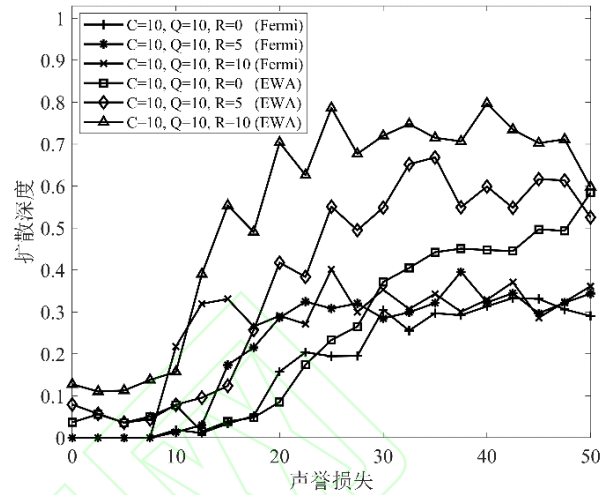


图 7 策略更新规则的敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis of strategy update rules

3.3.6 比较分析 为比较扩散深度对各参数的敏感性程度,在 C 、 Q 、 R 取值固定时,逐一改变参数取值,分别计算 $L=20$ 、 50 的扩散深度变化率和敏感性程度(扩散深度变化率/参数变化率),见表 4.初始比例 p 的敏感性最高,其次为随机加边概率 γ 、网络效应参数 θ_k ,而折现因子 ϕ 和期望调整因子 ε 的敏感性较低.

表4 参数敏感性比较分析

Table 4 Comparison of parameter sensitivity analysis

参数	基准参数	变化后参数	参数变化率	扩散深度变化率		敏感性程度	
				(L=20)	(L=50)	(L=20)	(L=50)
p	0.3	0.6	100%	186%	114%	186%	114%
γ	0.2	0.1	-50%	-23%	-29%	46%	57%
N	100	200	100%	6%	14%	6%	14%
λ	5	10	100%	14%	7%	14%	7%
ρ	0.5	0.8	60%	-14%	-17%	-24%	-28%
ϕ	0.5	0.1	-80%	3%	-5%	-4%	6%
θ_k	5	1	-80%	-34%	-17%	43%	21%
β	2	5	150%	-29%	-24%	-19%	-16%
ε	0.5	0.1	-80%	3%	7%	-4%	-9%

4 结论

4.1 当政府不干预垃圾分类在农村的推广时,垃圾分类将无法在农村自发持续并普遍推广.当已分类

农户的初始比例为 0.3 时,不使用声誉损失或奖励政策,最终垃圾分类策略在农村的扩散深度不足 0.05.

4.2 在一定范围内提高声誉损失或奖励的政策强度,均可显著促进垃圾分类策略在农村"熟人社会"

中的扩散。

4.3 仅靠单一政策,即便激励强度较高,扩散深度依然较低.若靠声誉损失与奖励两种政策相互配合,最终可实现低政策强度、高扩散深度的效果。

4.4 提高农户垃圾不分类的搭便车收益,会抑制垃圾分类策略扩散.当搭便车收益较强时,即使声誉损失可产生正向激励,但强度较低,不足以改变农户不分类的"搭便车"行为。

4.5 注重经验学习和适应能力的EWA学习策略相较于只注重当期收益的Fermi-Dirac函数,更能促进垃圾分类策略扩散。

4.6 上述结论广泛适用于已分类农户初始比例、熟人社会程度、规模或农户学习能力不同的农村,对中国不同类型和地区的农村垃圾分类均有启发意义。

5 政策建议

5.1 对于地方政府,采取积极措施干预农村垃圾分类,促进农户源头分类行为,以解决乡村垃圾处置公共品供给不足问题.政策措施应综合采用声誉损失和奖励制度,完善村级分类的管理机制和政策体系,加强资金和人力配置、提升管理能力。

5.2 对于基层政府和村委会,建立健全农户垃圾分类的考核、评比、奖惩制度,结合当地实际,充分利用"熟人社会"制定合适的声誉损失政策,综合实行精神与物质奖励。

5.3 为推进农村生活垃圾分类,管理部门可采取如下具体措施:(1)通过微信、宣传册、上门示范等,加强对垃圾分类的宣传力度,推动垃圾分类纳入乡规民约、融入农户生活,增强农户对垃圾分类的道德、荣辱观念,提高农户主动分类的责任意识,以减少"搭便车"行为。(2)注重建立农户垃圾分类的"熟人社会"舆论氛围,使农户相互监督,设置荣辱榜、红黑榜并量化排名,对农户给予相应的奖励或声誉惩罚。(3)保障垃圾分类考核、评比等信息的及时公开、真实有效,发挥"熟人社会"对农户分类的激励作用。

参考文献:

[1] 李丹, 陈冠益, 马文超, 等. 中国村镇生活垃圾特性及处理现状[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4187-4197.
Li D, Chen G Y, Ma W C, et al. Characteristics and treatment status of rural solid waste in China[J]. China Environmental Science, 2018, 38(11): 4187-4197

[2] 姜利娜, 赵霞. 农村生活垃圾分类治理: 模式比较与政策启示——以北京市4个生态涵养区的治理案例为例[J]. 中国农村观察, 2020(2): 16-33.
Jiang L N, Zhao X. Classified Treatment Management of Rural Domestic Waste: Model Comparison and Policy Enlightenment Based on a Case Study of Four Ecological Conservation Areas in Beijing[J]. China Rural Survey, 2020(2): 16-33.

[3] 彭韵, 李蕾, 彭绪亚, 等. 我国生活垃圾分类发展历程?障碍及对策[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3874-3879.
Peng Y, Li L, Peng X Y, et al. A review on municipal solid waste classification in China: development status, problems and counter measures[J]. China Environmental Science, 2018, 38(10): 3874-3879

[4] 蒋培. "熟人社会"视域下生活垃圾分类的社会逻辑阐释——基于浙江六池村的经验研究[J]. 兰州学刊, 2020(12): 172-180.
Jiang P. Social logic interpretation of domestic waste classification from the perspective of "acquaintance society" -- An Empirical Study Based on Liuchi village, Zhejiang Province [J]. Lanzhou Academic Journal, 2020(12): 172-180.

[5] 王丹丹, 菅利荣, 付帅帅. 城市生活垃圾分类回收治理激励监督机制研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 3188-3195.
Wang D D, Jian L R, Fu S S. Incentive and supervision mechanism of municipal solid waste separation and recycling[J]. China Environmental Science, 2020, 40(7): 3188-3195

[6] 丁建彪. 合作治理视角下中国农村垃圾处理模式研究[J]. 行政论坛, 2020, 27(4): 123-130.
Ding J B. Research on the Model of Rural Waste Disposal in China from the Perspective of Cooperative Governance[J]. Administrative Tribune, 2020, 27(4): 123-130.

[7] 丁波. 农村生活垃圾分类的嵌入性治理[J]. 人文杂志, 2020(8): 122-128.
Ding B. Embedded Treatment of Rural Domestic Waste Classification[J]. The Journal of Humanities, 2020(8): 122-128.

[8] 王晓楠. 城市居民垃圾分类行为影响路径研究——差异化意愿与行动[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3495-3505.
Wang X N. Study on the influence path of urban residents' waste separation behavior: the differentiated intentions and actions[J]. China Environmental Science, 2020, 40(8): 3495-3505.

[9] 邱成梅. 农户参与度视角下的农村垃圾治理绩效研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(5): 37-43.
Qiu C M. Research on the performance of rural household garbage management from the perspective of farmer' participation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(5): 37-43.

[10] 费孝通. 乡土中国 生育制度[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998: 23-33.
Fei X T. Local Chinese fertility system[M]. Beijing: Peking University Press, 1998: 23-33.

[11] 韩洪云, 张志坚, 朋文欢. 社会资本对居民生活垃圾分类行为的影响机理分析[J]. 浙江大学学报(人文社会科学版), 2016, 46(3): 164-179.
Peng H Y, Zhang Z J, Peng W H. An analysis of the influence mechanism of social capital on households' waste separation[J]. Journal of Zhejiang University(Humanities and Social Sciences), 2016, 46(3): 164-179.

[12] 蒋培. 规训与惩罚: 浙中农村生活垃圾分类处理的社会逻辑分析[J].

- 华中农业大学学报(社会科学版), 2019(3): 103-110+163-164.
- Jiang P. Discipline and punishment:social logic analysis of classified treatment of rural domestic waste in Zhejiang Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition) , 2019(3): 103-110+163-164.
- [13] 浙江省农村综合改革工作领导小组办公室. 一项小创新开辟新天地——浙江省龙游县贺田村建立垃圾处理新机制[J]. 中国财政, 2014(9): 62-63.
- Office of Zhejiang Provincial Leading Group for comprehensive rural reform. A small innovation opens up a new world -- a new mechanism for garbage disposal in Ha Tian Village, Longyou County, Zhejiang Province [J]. China State Finance, 2014(9): 62-63.
- [14] 陈绍军, 朱晨铭. 生态补偿视阈下农村垃圾分类兑换激励引导机制研究——以安徽黄山市S县生态美超市运作实践为例[J]. 学习论坛, 2020(2): 71-78.
- Chen Z J, Zhu C M. Research on incentive and guidance mechanism of rural waste classification exchange from the perspective of ecological compensation[J]. Tribune of Study, 2020(2): 71-78.
- [15] 唐林, 罗小锋, 张俊飏. 社会监督、群体认同与农户生活垃圾集中处理行为——基于面子观念的中介和调节作用[J]. 中国农村观察, 2019(2): 16.
- Tang L, Luo X F, Zhang J B. Social Supervision, Group Identity and Farmers' DomesticWasteCentralized Disposal Behavior: AnAnalysis Based on MediationEffect andRegulation Effect of the Face Concept[J]. China Rural Survey, 2019(2): 16.
- [16] 贺雪峰. 论半熟人社会——理解村委会选举的一个视角[J]. 政治学研究, 2000(3): 61-69.
- He X F. On the society of semi acquaintances -- A Perspective of understanding the election of village committee[J]. CASS Journal of Political Science, 2000(3): 61-69.
- [17] 夏支平. 熟人社会还是半熟人社会?——乡村人际关系变迁的思考 [J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2010, 10(6): 86-89.
- Xia Z. An acquaintance society or a semi-acquaintance one? A re-examination of the nature of vilalge in transition[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition) , 2010, 10(6): 86-89.
- [18] 田鹏, 陈绍军. "无主体半熟人社会":新型城镇化进程中农民集中居住行为研究——以江苏省镇江市平昌新城为例[J]. 人口与经济, 2016(4): 53-61.
- Tian P, Chen S J. "Unconscious society of semi-acquaintance": a research of peasants' concentrated residential area in the process of new urbanization: take Pingchang Community in Zhejiang of Jiangsu Province for example[J]. Population & Economics, 2016(4): 53-61.
- [19] 李爱喜. 社会资本对农户信用行为影响的机理分析[J]. 财经论丛, 2014(1): 49-55.
- Li X A. Mechanism analysis of the impact of social capital on farmer credit behavior[J]. Collected Essays on Finance and Economics, 2014(1): 49-55.
- [20] 何可, 张俊飏. "熟人社会"农村与"原子化"农村中的生猪养殖废弃物能源化利用——博弈、仿真与现实检验[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 15.
- He K, Zhang J B. Energy utilization of pig breeding waste at the acquaintance society and atomized society in rural areas: game analysis, simulation analysis and reality testing[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 15.
- [21] 蒋培. 农村垃圾分类处理的社会基础——基于浙中陆家村的实证研究[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2019, 18(6): 33-42+111.
- Jiang P. On social basis of rural garbage classification: based on an empirical study of Lujia in Zhejiang Province[J]. Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition) , 2019, 18(6): 33-42+111.
- [22] 曾鹏, 罗观翠. 集体行动何以可能? ——关于集体行动动力机制的文献综述[J]. 开放时代, 2006(1): 110-123+160.
- Zeng P, Luo G C. How is collective action possible?[J]. Open Times, 2006(1): 110-123+160.
- [23] 冯川. 小农生产的社会行为逻辑与制裁意欲的表达层级——基于广西宗族性村庄的考察[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2020, 20(3): 91-100.
- Feng C. Social behavior logic of small-sacle peasant production and expression level of sanction intention: based on the investigation of clan villages in Guangxi[J]. Journal of Northwest A&F University(Social Science Edition) , 2020, 20(3): 91-100.
- [24] 殷融, 张菲菲. 群体认同在集群行为中的作用机制[J]. 心理科学进展, 2015, 23(9): 1637-1646.
- Yin R, Zhang F F. The mechanism of group identity in collective action[J]. Advances in Psychological Science, 2015, 23(9): 1637-1646.
- [25] 张宏娟, 范如国. 基于复杂网络演化博弈的传统产业集群低碳演化模型研究[J]. 中国管理科学, 2014, 22(12): 41-47.
- Zhang H J, Fan R G. Research on low-carbon evolutionary model of traditional industrial clusters based on evolutionary game theory on complex network[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(12): 41-47.
- [26] Smith J M. The theory of games and the evolution of animal conflicts[J]. Journal of Theoretical Biology, 1974, 47(1): 209-221.
- [27] 杨涵新, 汪秉宏. 复杂网络上的演化博弈研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(2): 166-171.
- Yang H X, Wang B H. Review of the research of evolutionary games on complex network[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2012, 34(2): 166-171.
- [28] Friedman D. On Economic Applications of Evolutionary Game Theory[J]. Levine's Working Paper Archive, 2010.
- [29] Taylor P D, Jonker L B. Evolutionarily Stable Strategies and Game Dynamics[J]. Mathematical Biosciences, 1978, 40(1-2): 145-156.
- [30] 刘曼琴, 张耀辉. 城市生活垃圾处理价格规制的比较分析:按量收费与回收补贴[J]. 南方经济, 2018(2): 18.
- Liu M Q, Zhang Y H. A comparative analysis to the price regulation tools of urban living garbage disposa: unit-pricing and recycling subsidies[J]. South China Journal of Economics, 2018(2): 18.
- [31] 吴波, 李东进, 张初兵. 消费者回收行为研究述评与展望[J]. 中国流通经济, 2019, 33(9): 13.
- Wu B, Li D J, Zhang C B. Consumer recycling behavior: a literature review and future research outlook[J]. China Business and Market, 2019, 33(9): 13.
- [32] 刘庆健. 中国实施垃圾分类为何这么难?[J]. 生态经济, 2018, 34(1): 4.
- Liu Q J. Why is it so difficult for China to implement waste classification?[J]. Ecological Economy, 2018, 34(1): 4.
- [33] 柳艳, 吕飒飒, 刘东煜, 等. 现行公共场所垃圾分类方式的实效性

- 及改进方案:基于语义层次网络模型的研究[J]. 应用心理学, 2015, 21(3): 8.
- Liu Y, Lv S S, Liu D Y, et al. The effectiveness and improvement of current way of garbage classification in public areas: A study based on hierarchical network model[J]. Chinese Journal of Applied Psychology, 2015, 21(3): 8.
- [34] 楚德江, 陈永强. 农村垃圾治理的内源性动力及进路探究——以四川省丹棱县 L 村垃圾治理为例[J]. 环境保护, 2020, 48(20): 41-45.
- Chu D J, Chen Y Q. Research on the endogenous motivation and pathway of rural waste governance: a case study of waste governance in L village in Danling County, Sichuan Province[J]. Environmental Protection, 2020, 48(20): 41-45.
- [35] 贾亚娟, 赵敏娟. 生活垃圾污染感知、社会资本对农户垃圾分类水平的影响——基于陕西 1374 份农户调查数据[J]. 资源科学, 2020, 42(12): 2370-2381.
- Jia Y J, Zhao M J. Impact of domestic waste pollution perception and social capital on the farming households' sorting of waste: based on the survey of 1374 farming households in Shaanxi Province[J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2370-2381.
- [36] 王阳, 漆雁斌. 农村环境治理的现实困境与机制创新——基于委托代理的博弈分析[J]. 四川农业大学学报, 2012, 30(4): 473-477.
- Wang Y, Qi Y B. Study on practical dilemma and mechanism innovation of rural environment governance: using game theory based on principal agent[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2012, 30(4): 473-477.
- [37] 崔晶. 跨越生态环境协作治理中的集体行动:以祁连山区域生态治理为例[J]. 改革, 2019(1): 9.
- Cui J. The study on the collective action of collaborative governance in the cross-boundary ecological environment governance: the case study of Qilian Mountain[J]. Reform, 2019(1): 9.
- [38] Newman M, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model - ScienceDirect[J]. Physics Letters A, 1999, 263(4-6): 341-346.
- [39] Barabási A, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Sci, 1999, 286.
- [40] Camerer C, Ho T H. Experience-weighted Attraction Learning in Normal Form Games[J]. Econometrica, 2010, 67.
- [41] Camerer C F, Ho T H. Experience-Weighted Attraction Learning in Coordination Games: Probability Rules, Heterogeneity, and Time-Variation[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1998, 42(2-3): 305-326.
- [42] Ho T H, Weigelt K. Task Complexity, Equilibrium Selection, and Learning: An Experimental Study[J]. Management Science, 1996, 42(5): 659-679.
- [43] Wu B, Liu P, Xu X. An evolutionary analysis of low-carbon strategies based on the government-enterprise game in the complex network context[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141(JAN.10): 168-179.
- [44] Michael, L., Katz, et al. Network Externalities, Competition, and Compatibility[J]. The American Economic Review, 1985, 75(3): 424-440.
- [45] Xian Y B, University Y S, Guangzhou, et al. Adaptive Expectation, Complex Network and the Dynamic of Standard Diffusion——Research Based on Computational Economics[J]. Journal of Management Sciences, 2007.
- [46] 厉以宁. 发挥"X 效率", 更好调动积极性[J]. 前线, 2018(1): 112.
- Li Y N. Give play to "X efficiency" and better mobilize enthusiasm[J]. Frontline, 2018(1): 112.
- [47] 陈淑妮. 基于 X 效率提升的和谐型员工关系管理模型分析[J]. 深圳大学学报(人文社会科学版), 2006(1): 86-90.
- Chen S N. An analysis of the harmonious employee relation management model based on improving the X-Efficiency[J]. Journal of Shenzhen University(Humanities & Social Sciences), 2006(1): 86-90.
- [48] 邓毅, 马颖. 薪酬的边际激励效用递减规律和薪酬制度创新[J]. 经济经纬, 2003(3): 40-42.
- Deng Y, Ma Y. The rule of marginal incentive utility gradually decreasing and systematic innovation of salary[J]. Economic Survey, 2003(3): 40-42.
- [49] 黄炎忠, 罗小锋, 闫阿倩. 不同奖惩方式对农村居民生活垃圾集中处理行为与效果的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 1-7.
- Huang Y Z, Luo X F, Yan A Q. Effects of reward and punishment on the behavior and effect of rural residents' centralized treatment of domestic waste[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(2): 1-7.
- [50] 徐建中, 赵亚楠, 朱晓亚. 基于复杂网络演化博弈的企业低碳创新合作行为网络演化机理研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(6): 70-79.
- Xu J Z, Zhao Y N, Zhu X Y. Network Evolution Mechanism of Low Carbon Innovation Cooperation Behavior in Enterprises Based on Evolutionary Game Theory on Complex Network[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(6): 70-79.
- [51] Li J, Jiao J, Tang Y. An evolutionary analysis on the effect of government policies on electric vehicle diffusion in complex network[J]. Energy Policy, 2019, 129(JUN.): 1-12.
- [52] 徐莹莹, 綦良群. 基于复杂网络演化博弈的企业集群低碳技术创新扩散研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(8): 16-24.
- Xu Y Y, Qi L Q. Research on low carbon technological innovation diffusion in enterprises clusters based on evolutionary game theory on complex networks[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(8): 16-24.
- [53] 曹霞, 张路蓬, 刘国巍. 基于社会网络结构的创新扩散动力机制及其仿真研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(5): 149-156.
- Cao X, Zhang L P, Liu G W. Research on dynamic mechanism of innovation diffusion and its simulation based on the social network structure[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(5): 149-156.

作者简介: 魏夕凯(1999-),男,山东枣庄人,中国人民大学环境学院研究生,研究方向为博弈论,环境经济与管理。马本(1986-),男,河南洛阳人,中国人民大学环境学院副教授,研究方向为资源与环境经济学,在国内外权威核心期刊发表论文 20 余篇。