

DOI: 10.20103/j.stxb.202211213372

孙勇, 周侃, 滕鹤邳, 刘汉初, 孙中瑞. 高寒生态脆弱区农牧民生活垃圾集中处理激励机制与政策模拟——以藏北牧区为例. 生态学报, 2024, 44(8): 3185-3198.

Sun Y, Zhou K, Teng H Z, Liu H C, Sun Z R. Incentives and simulation for centralized treatment of domestic waste in the alpine ecologically fragile area: A case study of north Xizang. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3185-3198.

高寒生态脆弱区农牧民生活垃圾集中处理激励机制与政策模拟

——以藏北牧区为例

孙 勇¹, 周 侃^{2,3,*}, 滕鹤邳^{2,4}, 刘汉初⁵, 孙中瑞⁵

1 广州大学 公共管理学院, 广州 510006

2 中国科学院地理科学与资源研究所区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049

4 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

5 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

摘要: 高寒生态脆弱区环境本底敏感而脆弱, 生活垃圾不当处理极易加剧生态系统退化风险, 揭示区内农牧民生活垃圾集中处理的多主体互动机制及政策激励效果对落实生活垃圾治理、降低生态风险和提升人居环境具有重要意义。基于藏北牧区的案例, 考虑高寒生态脆弱区的气候高寒、牧民定居点分散等现实约束, 构建村镇基层政府和农牧民的演化博弈模型, 探究区内农牧民生活垃圾处理的激励机制。结果显示: ①农牧民参与是提高高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理效率的关键, 村镇基层政府的奖惩措施能够显著激励农牧民参与生活垃圾集中处理, 奖惩机制中惩罚的约束作用更为显著。②村镇基层政府的宣传和设施建设措施能够显著促进农牧民参与生活垃圾集中处理, 设施配置对农牧民参与行为影响的敏感度明显大于宣传教育, 完善设施建设是促进生活垃圾集中处理的关键措施。③优化高寒生态脆弱区农牧民生活垃圾集中处理制度的政策导向: 立足高寒生态脆弱区气候高寒、牧民定居点分散及产污特性, 优化生活垃圾集中处理设施的规划建设和运行管理、加强村镇基层政府参与治理的检查评估和行政管理、完善农牧民参与治理的激励约束机制。

关键词: 生活垃圾; 高寒生态脆弱区; 农牧民; 村镇政府; 政策模拟; 演化博弈

Incentives and simulation for centralized treatment of domestic waste in the alpine ecologically fragile area: a case study of north Xizang

SUN Yong¹, ZHOU Kan^{2,3,*}, TENG Hezhi^{2,4}, LIU Hanchu⁵, SUN Zhongrui⁵

1 School of Public Administration, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

2 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, China

5 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: The environment in the alpine and fragile ecological zone is sensitive and vulnerable, and improper disposal of domestic waste can easily aggravate the risk of ecosystem degradation. It is of great significance to reveal the multi-agent

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371182, 41971164, 42001139); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0406)

收稿日期: 2022-11-21; 网络出版日期: 2024-01-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhoukan@igsrr.ac.cn

interaction mechanism and policy incentive effect of centralized domestic waste disposal among farmers and herdsmen in the zone for implementing domestic waste management, reducing ecological risk and improving living quality. Based on the case of the northern Xizang pastoral area, this paper, taking into account the realistic constraints of the alpine and fragile agricultural and pastoral areas, such as the cold climate, the scattered settlement of farmers and herdsmen, and the weak local fiscal strength, comprehensively considers the incentive measures of the village and town grassroots governments and the cost-benefit of farmers and herdsmen, and constructs a two-party evolutionary game model of the village and town grassroots governments and farmers and herdsmen participating in it, and examines the incentive effect of different policy measures and the interaction game mechanism of stakeholders through numerical simulation. The results show that: ① The participation of farmers and herdsmen is the key to improve the efficiency of centralized domestic waste disposal in the alpine and fragile ecological zone. The reward and punishment measures of the village and town grassroots governments can significantly motivate farmers and herdsmen to participate in centralized domestic waste disposal, and the constraint effect of punishment is more significant. ② The propaganda and facility construction measures of the village and town grassroots governments can significantly promote farmers and herdsmen to participate in centralized domestic waste disposal. The sensitivity of facility configuration to farmers and herdsmen's participation behavior is significantly higher than that of propaganda and education. Improving facility construction is the key measure to promote centralized domestic waste disposal. ③ In the future, it is necessary to optimize the centralized domestic waste disposal system for farmers and herdsmen in the alpine and fragile ecological zone, based on the cold climate, the scattered settlement of herdsmen and the pollution characteristics of the alpine and fragile ecological zone, optimize the planning, construction and operation management of centralized domestic waste disposal facilities, strengthen the inspection, evaluation and administrative management of village and town grassroots governments' participation in governance, and improve the incentive and constraint mechanism of farmers and herdsmen's participation in governance. This paper relatively systematically reveals the collaborative mechanism of centralized domestic waste disposal in villages and towns, which also has reference significance for the research and policy formulation of environmental governance problems in other regions.

Key Words: domestic waste; alpine ecologically fragile areas; farmers and herdsmen; village and township grassroots governments; policy simulation; evolutionary game

高寒生态脆弱区生态环境本底敏感而脆弱,抗干扰能力和自我修复能力差,不合理人类活动极易加剧生态系统退化风险^[1]。随着经济社会的发展,高寒生态脆弱区的人口规模和生活水平不断提高,导致生活垃圾产生量增加迅速^[2-3],其不当处理导致的面源污染问题日益突出^[4],在局部对水源、土壤以及空气带来严重二次污染,破坏了经济、社会以及生态系统间的平衡^[5-7]。相比较一般平原地区,在高寒生态脆弱的藏北牧区,生活垃圾在自然条件下降解速度较慢,所产生的环境影响更为显著,分散化处理的生态环境风险更大,因此集中处理重要且必要,尤其是有毒害垃圾和难降解垃圾。然而,现有集中处理模式、基础设施和技术水平难以适应高寒生态脆弱区显著的生态环境问题,且无法兼顾清洁达标和成本控制,使得生活垃圾治理成为高寒生态脆弱区村镇人居环境整治的一大挑战。因此,为确保生态安全和实现可持续发展,有必要针对高寒生态脆弱区的现实约束,探讨农牧民生活垃圾集中处理的制度优化方案。

国内外生活垃圾治理的研究主要集中在工程技术、经济社会和政策管理等领域^[4,8-9],随着乡村振兴战略和农村人居环境整治行动的推进,各个领域的学者都开始关注村镇生活垃圾治理的问题,科学评估了村镇生活垃圾的环境胁迫效应^[10-11]和主要挑战^[12-13],认为治理难点在于村镇居民点分散、基层治理不力等因素导致的治理效率低下^[13],故有效推进村镇生活垃圾治理需要坚持因地制宜、突出分类施策、突出农民主体^[14]。但针对高寒生态脆弱地区生活垃圾治理的多主体协同机制和政策效应的研究相对薄弱,主要通过定性分析和调查问卷的描述统计,梳理了生活垃圾治理的设施配置^[4]、环境风险^[15]、农牧民认知^[16]和应对政策^[14,17],并未充分关注高寒生态脆弱区在气候高寒性、牧民定居点分散和地方财政实力薄弱等现实约束影响下生活垃圾集中处理的政策评估与分析。因此,为有效推进高寒生态脆弱农牧区生活垃圾集中处理,迫切需要深化与高

寒生态脆弱农牧区生态环境条件、经济发展阶段和社会文化特征相适应的生活垃圾政策分析与制度研究,为因地制宜推动高寒生态脆弱农牧区的生活垃圾治理奠定基础。

新时期生态环境治理的内生逻辑越来越强调利益相关者的参与,农牧民是高寒生态脆弱区生活垃圾治理的主要参与者,其广泛参与生活垃圾集中处理能够减少内源性污染,是解决村镇生态环境问题的必要条件^[18-19]。但一些研究表明,对偏远地区的农牧民而言,他们更习惯简单堆放、掩埋或燃烧等分散处理方式,极易造成二次污染和环境风险^[13-14]。尽管部分农牧民愿意参与垃圾集中处理,但支付意愿和参与频率不高^[19-20],其参与行为受环境意识、教育水平、经济水平以及垃圾集中处理设施等因素的影响^[18,20-22]。村镇基层政府介入可以弥补市场机制下公共服务供给的不足,通过一定的奖惩机制、设施建设和政策宣传等措施,还可以激发农牧民参与生活垃圾集中处理的积极性^[23-25]。在生活垃圾集中处理过程中,充分认识农牧民与村镇基层政府之间的互动博弈过程^[24,26]是优化多主体协同治理制度的关键。

不少研究采用演化博弈来探讨环境治理中利益相关者关系和制度优化设计方案^[27-30],通过选择主要利益主体并抽象出其行为成本和收益的关键参数,讨论参与主体在有限理性条件下不同决策行为,可为环境治理中利益相关者协同政策的制定提供关键信息,这一方法也适用于村镇生活垃圾集中处理激励机制的研究。已有村镇环境治理的演化博弈研究一般考虑农牧民产污排污习惯、经济能力、环境意识等因素,探讨政府不同监管措施(如奖惩措施、宣传措施等)对农民环境行为的影响^[31-33],这些研究均为本研究提供了良好的启示。

综上所述,针对高寒生态脆弱农牧区气候高寒、农牧民定居点分散和地方财政力量薄弱等现实约束,本研究基于青藏高原高寒生态脆弱区生活垃圾产污特性和现行生活垃圾集中处理模式对高寒生态脆弱区配置的不均衡性,综合考虑村镇基层政府的激励措施与农牧民成本收益,构建村镇基层政府和农牧民参与的双方演化博弈模型,并通过数值模拟考察不同政策措施的激励效果与利益相关者的互动博弈机制,提出在农牧民参与意愿不足、村镇基层政府支付能力有限、居民点分散约束下农牧民生活垃圾集中处理的激励机制与政策优化路径。本文在科学认知高寒生态脆弱农牧区生活垃圾治理能力不足问题的基础上,紧扣高寒生态脆弱区域人居环境整治的现实需求,以寻找区域内部要素配置与主体协同机制为重点,构建一个包含村镇基层政府和农牧民双方利益相关者群体参与的生活垃圾集中处理框架,相对系统地揭示了村镇生活垃圾集中处理协同机制,对其他地区村镇环境治理问题的研究和政策制定同样具有借鉴意义。

1 模型设计

1.1 模型背景

为探索高寒生态脆弱区生活垃圾治理的有效激励机制,在开展第二次青藏高原综合科学考察的基础上,本研究根据调研结果分析明确了高寒生态脆弱区生活垃圾中处理博弈中的关键主体及其行为特征与互动博弈机制。本研究的主要调研区域为藏北牧区(图1),实地调研发现藏北牧区在气候条件高寒、生态环境敏感和牧民定居点分散特性的共同作用下,生活垃圾处理设施覆盖水平和处理技术相对滞后,且生活垃圾集中处理的频率较低,反而导致生活垃圾集中处理站荒废,生活垃圾集中站附近区域成为污染严重的地区,治理效果并不理想。藏北很多牧区正在探索“户产污、村收集、乡转运、县处理”治理模式,不断推进牧区生活垃圾集中处理体系建设(图1)。在生活垃圾处理的前端,即“户产污、村收集和乡转运”阶段,农牧民参与的激励问题是影响生活垃圾集中处理的关键,这一过程中村镇基层政府是主要的引导者,而农牧民是主要参与者,双方组成高寒生态脆弱区农牧民参与生活垃圾集中处理的演化博弈系统。

村镇基层政府作为高寒生态脆弱区生活垃圾治理的引导者和公共产品供给者,协调并负责当地农牧民生活垃圾的处理工作。中央政府十分重视村镇人居环境整治,并制定了一系列考核指标来激励村镇基层政府参与到村镇生活垃圾治理,藏北牧区的各村镇基层政府也制定了奖惩、宣传措施等一系列政策激励农牧民自觉参与生活垃圾集中处理,鼓励将牧民定居点环境卫生等要求纳入民约,引导培育原住牧民积极维护村庄环境卫生的意识等。但村镇基层政府治理牧民定居点生活垃圾存在较大的成本约束,尤其是海拔高、牧民定居点

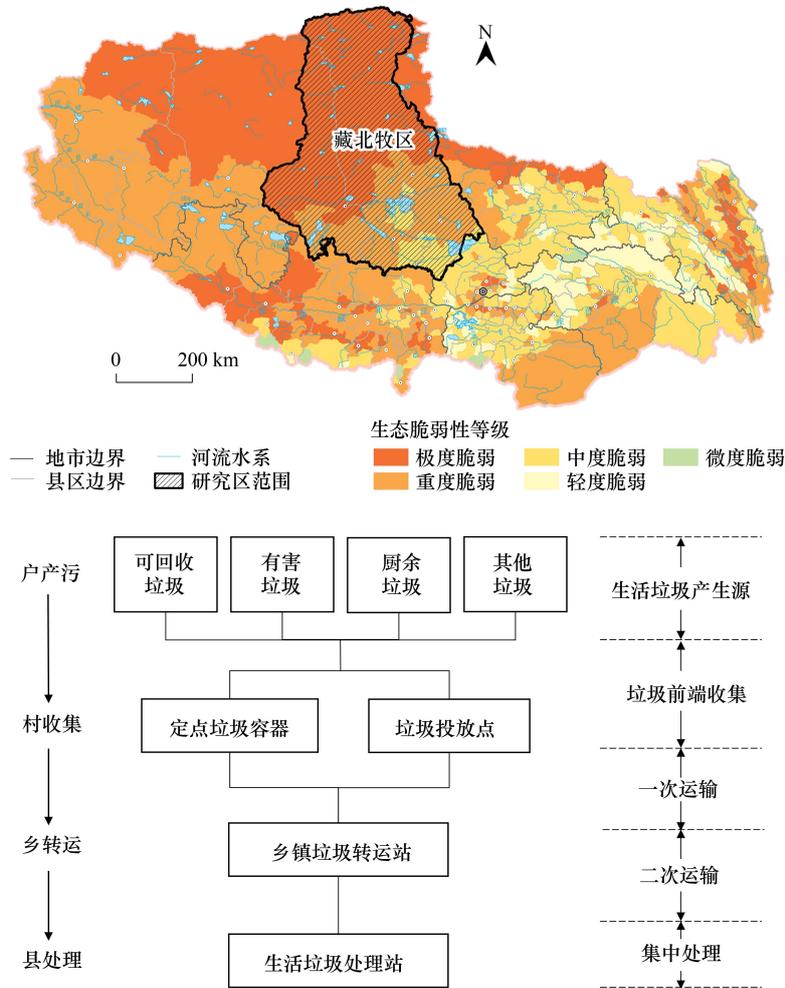


图1 藏北牧区分布及农牧民生活垃圾集中处理模式

Fig.1 The location of pastoral areas in northern Xizang and the mode of centralized treatment of domestic waste by farmers and herdsmen

分散和转运路程远等约束导致村镇基层政府的参与积极性可能不高和治理效率低下。

农牧民是高寒生态脆弱区生活垃圾治理的受益者,更是重要的参与者、建设者。一方面农牧民出于自身的环境意识的考虑,参与生活垃圾分类与集中处理;但另一方面,农牧民可能出于生活习惯、时间成本和物质成本等考虑,参与的积极性不高,尤其在生态脆弱区牧民定居点较为分散,垃圾处理设施覆盖率不高,生活垃圾集中投放的时间成本较大,此时农牧民参与集中处理的意愿可能较低,因此选择堆放、填埋、焚烧等传统方式处理生活垃圾。有效的政府引导和激励措施能够扩大农牧民参与生活垃圾集中处理的收益并减少其参与成本,从而提高其参与的积极性,实现高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理的良性发展机制。

1.2 数据来源与处理

本研究数据主要包括地理信息数据与垃圾治理调查数据。①地理信息数据,包括行政区边界数据,来自中国 1:400 万基础地理要素数据集;数字高程模型数据 (DEM),来自资源环境科学与数据中心。②生活垃圾治理调查数据,主要来自作者的问卷调查与访谈,作者于 2021 年 8 月前往藏北牧区进行实地调研,调研方法包括访谈、观察和拍照等,访谈对象主要包括农牧民、村干部、乡镇干部和县级环保部门负责人等,重点关注了农牧民的生活垃圾产生量、处理方式、参与意愿、成本收益等方面,以及村镇基层政府的生活垃圾治理措施、设施建设、政策宣传等方面的现状与问题。对获取的调研资料进行内容分析,提取出与生活垃圾集中处理相关的主题、概念和关键词,构建了农牧民和村镇基层政府的行为模式和博弈关系。

1.3 模型假设

根据模型背景的分析,本文提出以下假设(表 1):

假设 1:村镇基层政府和农牧民均具有有限理性,他们基于一定成本和收益因素做出决策。初始选择可能并不完全符合其利益,通过互动、试错、学习的过程可以不断逼近其最优策略。在高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理的演化博弈中,村镇基层政府的策略集合为(监管,不监管),假设村镇基层政府选择监管的概率为 x ,选择不监管的概率为 $1-x$ 。农牧民的策略集合为(参与,不参与),假设其选择参与生活垃圾集中处理的概率为 y ,选择不参与生活垃圾集中处理的概率为 $1-y$ 。

假设 2:藏北牧区的生态环境较为脆弱,生活垃圾随意排放容易导致草地退化、土壤污染和水污染等严重环境问题,村镇基层政府有动机推进农牧民积极参与生活垃圾集中处理。当村镇基层政府监管且农牧民参与时,村镇基层政府会受到上级政府的奖励 R_g ;反之,其生活垃圾治理无效或农牧民不参与垃圾治理时,村镇基层政府会受到上级政府惩罚 P_g ,同时还会受到生活垃圾处理不当导致的生态效益损失 L_g 。村镇基层政府监管需要支付一定的成本 C_g ,主要包括两方面:其一是生活垃圾治理的直接成本,包括建设垃圾集中处理设施、宣传垃圾集中处理政策以及购买垃圾处理企业服务等;其二是由于藏北牧区村镇基层政府支付能力有限,当其投入一定财政进行生活垃圾治理时,必然挤占其他用途的财政资源,形成一定机会成本。高寒生态脆弱区域居民点分散,这导致垃圾处理设施建设成本较大,从而造成垃圾处理设施建设密度较低的现状,假设垃圾处理设施的建设密度为 $d(0 < d < 1)$ 。为了促进农牧民参与生活垃圾分类与集中处理,村镇基层政府需要加强政策宣传,假设宣传强度为 $s(0 < s < 1)$ 。

假设 3:分散性农牧民参与垃圾集中处理需要支付一定物质成本及较高时间成本,比如购置垃圾袋、垃圾分类及将垃圾运送至集中处理点等,但也会获得环境保护的好处,因此其是否参与的行为决策具有不确定性。若农牧民参与生活垃圾集中处理,会产生参与成本 C_h ,并获得环境偏好收益 R_e ,还可以获得村镇基层政府的奖励 R_h ,如公示表扬、换购商品等。若农牧民不参与生活垃圾集中处理,会因为生活垃圾堆积或随意丢弃导致生活环境破坏,因此会影响其自身健康而产生一定健康风险,同时因为不参与垃圾集中处理可能会面临周围农牧民的批评、指责,从而给其带来一定的不参与损失 L_h 。同时,如果农牧民不参与垃圾集中处理,则可能会受到村镇基层政府的惩罚 P_h ,如公示批评、上门劝告或现金罚款等。

表 1 村镇基层政府和农牧民的两方演化博弈模型参数

Table 1 Parameters of the evolutionary game model for village and township grassroots governments and farmers and herdsmen

| 参数 Parameters | 含义 Meaning | 参数 Parameters | 含义 Meaning |
|------------------|-----------------|------------------|--------------------------|
| R_g | 村镇基层政府受到上级政府的奖励 | R_e | 农牧民参与生活垃圾集中处理的环境偏好收益 |
| P_g | 村镇基层政府受到上级政府的惩罚 | R_h | 村镇基层政府对农牧民参与生活垃圾集中处理的奖励 |
| C_g | 村镇基层政府的监管成本 | L_h | 农牧民不参与垃圾集中处理的损失 |
| d | 垃圾处理设施的建设密度 | P_h | 村镇基层政府对农牧民不参与生活垃圾集中处理的惩罚 |
| s | 垃圾集中处理政策的宣传强度 | x | 村镇基层政府选择监管的比例 |
| C_h | 农牧民参与生活垃圾集中处理成本 | y | 农牧民选择参与生活垃圾集中处理比例 |

1.4 支付矩阵

进一步根据参数设定构建包含村镇基层政府和农牧民的双方博弈模型,假设双方均是有限理性的参与主体,均能根据自己的意愿进行策略选择,可以得到两方博弈主体的支付矩阵(表 2)。

2 模型分析

2.1 博弈主体的复制动态方程

在演化博弈中,假设博弈参与主体的策略选择相互独立,同时进行重复博弈,因此可以分别讨论不同参与主体策略选择的复制动态。设村镇基层政府选择监管策略的期望收益为 E_{11} ,选择不监管策略的期望收益为

E_{12} , 平均收益为 \bar{E}_1 , 则有:

$$\begin{cases} E_{11} = (-P_g + P_h - C_g d(1+s))(1-y) + (R_g - R_h - C_g d(1+s))y \\ E_{12} = -P_g(1-y) \\ \bar{E}_1 = xE_{11} + (1-x)E_{12} \end{cases} \quad (1)$$

表 2 支付矩阵

Table 2 Payment matrix

| 农牧民 Farmers and herdsmen | 村镇基层政府 Village and township grassroots governments | |
|----------------------------------|--|--------------------------------|
| | 监管(x) Supervision (x) | 不监管(1-x) Non-supervision (1-x) |
| 参与(y) Participation (y) | $R_g - d(1+s) C_g - R_h$ $-(1-d) C_h + (1+s) R_e + R_h$ | 0 $-C_h + R_e$ |
| 不参与(1-y) Non-participation (1-y) | $-P_g - d(1+s) C_g + P_h$ $-(1+s) L_h - P_h$ | $-P_g$ $-L_h$ |

根据 Malthusian 动态方程, 村镇基层政府选择监管策略的复制动态方程为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{11} - \bar{E}_1) = (-1+x)x(C_g d(1+s) + P_h(-1+y) + (-R_g + R_h)y) \quad (2)$$

同理可以得到农牧民选择参与生活垃圾集中处理策略的复制动态方程为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{21} - \bar{E}_2) = -(-1+y)y \begin{pmatrix} L_h + R_e + P_h x + R_h x + L_h s x + \\ R_e s x + C_h(-1+dx) \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.2 博弈主体的稳定策略

联立式(2)和式(3)得到高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理的两维动力系统(I), 即:

$$\begin{cases} F(x) = (-1+x)x(C_g d(1+s) + P_h(-1+y) + (-R_g + R_h)y) \\ F(y) = -(-1+y)y(L_h + R_e + P_h x + R_h x + L_h s x + R_e s x + C_h(-1+dx)) \end{cases} \quad (4)$$

令 $(F(x), F(y)) = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}\right) = (0, 0)$, 可以得到两维动力系统(I)有 5 个局部均衡点: $E_1(0, 0), E_2(0, 1),$

$E_3(1, 0), E_4(1, 1), E_5((C_h - L_h - R_e)/(C_h d + P_h + R_h + L_h s + R_e s), (-C_g d + P_g + P_h - C_g d s)/(P_g + P_h - R_g + R_h))$ 。

以上均衡点并不一定是演化博弈系统的稳定策略(ESS), 因此还要讨论这 5 个稳定点是否为稳定策略, 以及其成为稳定策略的条件。进一步通过 Jacobi 矩阵来判断以上均衡点的局部稳定性, 将 $F(x), F(y)$ 分别对 x, y 求一阶偏导数, 得到博弈方程的雅可比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} F_x(x) & F_y(x) \\ F_x(y) & F_y(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $a_{11} = (-1+2x)(C_g d(1+s) + P_h(-1+y) + (-R_g + R_h)y), a_{12} = (P_h - R_g + R_h)(-1+x)x, a_{21} = -(C_h d + P_h + R_h + L_h s + R_e s)(-1+y)y, a_{22} = (L_h + R_e + P_h x + R_h x + L_h s x + R_e s x + C_h(-1+dx))(1-2y)$ 。

雅可比矩阵 J 的行列式 $\det J = a_{11} \times a_{22} - a_{12} \times a_{21}$, 迹 $\text{tr} J = a_{11} + a_{22}$, 当 $\det J > 0$ 且 $\text{tr} J < 0$ 时, 均衡点是稳定状态。根据式(5)可以得到表 3。

表 3 中, E 和 F 分别为:

$$E = - \frac{(C_h - L_h - R_e)(P_h - R_g + R_h)(C_h(-1+d) + L_h + P_h + R_e + R_h + L_h s + R_e s)}{(C_h d + P_h + R_h + L_h s + R_e s)^2} \quad (6)$$

$$F = - \frac{(C_h d + P_h + R_h + L_h s + R_e s)(-P_h + C_g d(1+s))(-R_g + R_h + C_g d(1+s))}{(P_h - R_g + R_h)^2} \quad (7)$$

表 3 局部均衡点处 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} 具体取值

Table 3 Values of a_{11} , a_{12} , a_{21} and a_{22} at local equilibrium points

| 局部均衡点 Local equilibrium point | a_{11} | a_{12} | a_{21} | a_{22} |
|----------------------------------|----------------------------|----------|----------|--|
| $E_1(0,0)$ | $P_h - C_g d (1+s)$ | 0 | 0 | $-C_h + L_h + R_e$ |
| $E_2(0,1)$ | $R_g - R_h - C_g d (1+s)$ | 0 | 0 | $C_h - L_h - R_e$ |
| $E_3(1,0)$ | $-P_h + C_g d (1+s)$ | 0 | 0 | $C_h(-1+d) + L_h + P_h + R_e + R_h + L_h s + R_e s$ |
| $E_4(1,1)$ | $-R_g + R_h + C_g d (1+s)$ | 0 | 0 | $-C_h(-1+d) - L_h - P_h - R_e - R_h - L_h s - R_e s$ |
| $E_5(M,N)$ | 0 | E | F | 0 |

$$a_{11} = (-1+2x)(C_g d(1+s) + P_h(-1+y) + (-R_g + R_h)y), a_{12} = (P_h - R_g + R_h)(-1+x)x, a_{21} = -(C_h d + P_h + R_h + L_h s + R_e s)(-1+y)y, a_{22} = (L_h + R_e + P_h x + R_h x + L_h s x + R_e s x + C_h(-1+dx))(1-2y)$$

由式(6)和式(7)可以计算得出,在均衡点 (M, N) 处, $\text{tr}J = a_{11} + a_{22} = 0$, 不满足稳定均衡的条件。因此,该点一定不是渐进稳定点。所以只需要根据雅可比矩阵进一步判别其他 4 个均衡点的渐近稳定性,可以得到 4 种情景。下面分情形讨论:

情景 1: $(P_h - C_g d (1+s)) (-C_h + L_h + R_e) > 0$ 且 $P_h - C_g d (1+s) - C_h + L_h + R_e < 0$ 时,系统(I)存在一个稳定均衡策略 $(0, 0)$, 即村镇基层政府不监管,农牧民不参与。对应这一条件与均衡策略,在监管较弱的粗放发展时期,上级政府并未高度重视高寒生态脆弱地区的环境整治,村镇基层政府参与监管的政治绩效不高,同时由于气候高寒、牧民定居点分散等现实约束导致监管成本较大,村镇基层政府缺乏监管积极性;而且高寒生态脆弱地区农牧民生活垃圾集中处理的意识相对薄弱且没有形成生活垃圾集中处理的习惯,同时设施覆盖率不高,导致参与成本过大,此时其缺乏参与积极性,因此形成生活垃圾不治的恶性稳态均衡。

情景 2: $(R_g - R_h - C_g d (1+s)) (C_h - L_h - R_e) > 0$ 且 $R_g - R_h - C_g d (1+s) + C_h - L_h - R_e < 0$ 时,系统(I)存在一个稳定均衡策略 $(0, 1)$, 即村镇基层政府不监管,农牧民参与。对应这一条件与均衡策略,在生活垃圾治理进入高级阶段以后,生活垃圾治理已经得到了很好的推广和实施,农牧民已经形成了分类和集中处理的习惯,所以不再需要政府的过多干预和奖励。而事实上,根据藏北牧区调研资料,在高寒生态脆弱区由于气候高寒、原住牧民定居点分散,如果缺乏政府参与的基础设施建设和制度保障,仅仅依靠农牧民自发组织形成生活垃圾集中治理体系受到的成本约束太大,在短期内村镇基层政府的介入与政策支持依然十分必要。

情景 3: $(-P_h + C_g d (1+s)) (C_h(-1+d) + L_h + P_h + R_e + R_h + L_h s + R_e s) > 0$ 且 $-P_h + C_g d (1+s) + C_h(-1+d) + L_h + P_h + R_e + R_h + L_h s + R_e s < 0$ 时,系统(I)存在一个稳定均衡策略 $(1, 0)$, 即村镇基层政府监管,农牧民不参与。随着气候变化加剧和人类活动增加,高寒生态脆弱地区的生态安全风险也不断增加,此时还面临青藏高原生态文明建设和生态安全保护的政策压力,村镇基层政府参与生活垃圾集中处理监管的积极性较大;但在生活垃圾集中处理体系建设初期,村镇基层政府监管及设施覆盖率不足且宣传力度较低,农牧民参与成本较大或收益不足,其没有参与的积极性,因此形成生活垃圾集中处理监管无效的恶性稳态均衡。

情景 4: $(-R_g + R_h + C_g d (1+s)) (-C_h(-1+d) - L_h - P_h - R_e - R_h - L_h s - R_e s) > 0$ 且 $-R_g + R_h + C_g d (1+s) - C_h(-1+d) - L_h - P_h - R_e - R_h - L_h s - R_e s < 0$ 时,系统(I)存在一个稳定均衡策略 $(1, 1)$, 即村镇基层政府监管,农牧民参与。随着生活垃圾集中处理体系建设的不断完善,牧区生活垃圾治理的规模效应得以发挥,村镇基层政府的监管成本降低,且随着人们环境意识的提高,对生态产品的需求越来越大,保护好高寒生态脆弱区的人居环境能够给村镇基层政府带来生态效益,此时其有监管的积极性;在便捷且高覆盖率的设施配置条件下,农牧民参与成本小且参与收益较大,使其具有参与积极性,因此形成生活垃圾集中处理有效监管的良性稳态均衡。显然,这一情形是相对理想的稳定均衡状态,是高寒生态脆弱地区生活垃圾集中处理政策制定应该考虑的目标情景。

在高寒生态脆弱地区生活垃圾集中处理政策制定应该考虑的目标情景 $(1, 1)$ 中,当满足不同条件时,博弈系统的演化路径存在差异(表 4)。可以分为四种情况来讨论:

(1) 当 $P_h < C_g d(1+s) < R_g - R_h$ 且 $(C_h(1-d) - P_h - R_h)/(1+s) < L_h + R_e < C_h$ 时, 系统(I) 存在两个演化稳定策略(0,0) 和(1,1)。此时,(0,1) 和(1,0) 为不稳定点。此时, 村镇基层政府和农牧民之间的生活垃圾集中处理的博弈受到初始行为比例的影响, 而呈现出动态演化趋势的不确定性。当村镇基层政府监管、农牧民参与的初始比例较大时, 系统可能趋向(1,1) 的均衡; 当政府监管、农牧民参与的初始比例较小时, 系统可能趋向(0,0) 的均衡。

(2) 当 $C_g d(1+s) < \min(R_g - R_h, P_h)$ 且 $(C_h(1-d) - P_h - R_h)/(1+s) < L_h + R_e < C_h$ 时, 系统(I) 存在唯一的稳定策略, 即(1,1)。此时,(0,0) 和(1,0) 为鞍点,(0,1) 为不稳定策略。此时, 系统(I) 会从任何初始状态下收敛到稳定策略(1,1)。特别地, 在初始状态为(0,1), 即村镇基层政府选择不监管, 农牧民选择参与生活垃圾集中处理时, 系统(I) 会沿着水平方向向右收敛, 直到达到稳定策略(1,1)。

(3) 当 $P_h < C_g d(1+s) < R_g - R_h$ 且 $L_h + R_e > C_h$ 时, 系统(I) 存在唯一的稳定策略, 即(1,1)。此时,(0,0) 和(0,1) 为鞍点,(1,0) 为不稳定均衡策略。此时, 系统(I) 会从任何初始状态下收敛到稳定策略(1,1)。特别地, 在初始状态为(1,0), 即村镇基层政府选择监管, 农牧民选择不参与生活垃圾集中处理时, 系统(I) 会沿着垂直方向向上收敛, 直到达到稳定策略(1,1)。

(4) 当 $C_g d(1+s) < \min(R_g - R_h, P_h)$ 且 $L_h + R_e > C_h$ 时, 系统(I) 存在唯一的稳定策略, 即(1,1)。此时,(0,1) 和(1,0) 为鞍点,(0,0) 为不稳定策略。此时系统(I) 会从任何初始状态下收敛到稳定策略(1,1)。特别地, 在初始状态为(0,0), 即村镇基层政府选择不监管, 农牧民选择不参与生活垃圾集中处理时, 系统(I) 会沿着对角线向右上角收敛直到达到稳定策略(1,1)。

表 4 局部均衡点(1,1) 的渐近稳定性分析

Table 4 Analysis of the asymptotic stability of local equilibrium points (1,1)

| 均衡点 Equilibrium point | 条件(1) Condition (1) | | | 条件(2) Condition (2) | | |
|--------------------------|---------------------|------|---------------|---------------------|------|---------------|
| | trJ | detJ | 稳定性 Stability | trJ | detJ | 稳定性 Stability |
| (0,0) | - | + | ESS | 不确定 | - | 鞍点 |
| (0,1) | + | + | 不稳定点 | + | + | 不稳定点 |
| (1,0) | + | + | 不稳定点 | 不确定 | - | 鞍点 |
| (1,1) | - | + | ESS | - | + | ESS |

| 均衡点 Equilibrium point | 条件(3) Condition (3) | | | 条件(4) Condition (4) | | |
|--------------------------|---------------------|------|---------------|---------------------|------|---------------|
| | trJ | detJ | 稳定性 Stability | trJ | detJ | 稳定性 Stability |
| (0,0) | 不确定 | - | 鞍点 | + | + | 不稳定点 |
| (0,1) | 不确定 | - | 鞍点 | 不确定 | - | 鞍点 |
| (1,0) | + | + | 不稳定点 | 不确定 | - | 鞍点 |
| (1,1) | - | + | ESS | - | + | ESS |

trJ: 雅可比矩阵 J 的迹 The trace of the Jacobian matrix J; detJ: 雅可比矩阵 J 的行列式 The determinant of the Jacobian matrix J

3 数值模拟

为更加直观地分析高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理的演化博弈动态过程, 并检验模型分析的准确性, 进一步基于 Matlab 软件, 以目标情景(1,1) 的条件为基础展开数值模拟。

3.1 模型检验

根据稳定均衡策略分析, 在目标情景(1,1) 中, 可能因为条件差异形成 4 种演化路径。为检验模型分析的正确性, 根据条件(1) — (4) 的条件初步设定参数数值(表 5)。同时, 基于调研获取的资料进行估值, 与基于模型分析的参数数值设定结果相互校验, 从而确定不同情景下的参数数值。根据调研资料, 藏北牧区多数地区政府均采取了一定的村镇生活垃圾治理措施, 只不过取得的效果相对有限, 因此可以假设村镇基层政府选择监管策略的比例 x 为 0.6; 此外, 调研资料显示, 目前农牧民参与意愿不足, 青藏高原地区村镇生活垃圾治理率仅为 47.76%, 因此可以假设农牧民选择参与策略的比例 y 为 0.5, 设置模拟周期 t 为 20。

数值模拟结果显示(图 2),条件(1)下,可能存在两个稳定均衡策略(0,0)和(1,1),条件(2)、条件(3)和条件(4)均存在唯一的稳定策略,即(1,1)。模拟结果与表 4 模型分析结果一致,可见前文准确分析了村镇基层政府与农牧民参与下的高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理演化博弈均衡策略的稳定性。

表 5 仿真参数设置

Table 5 Simulation parameter Settings

| 参数 Parameters | 条件(1) Condition (1) | 条件(2) Condition (2) | 条件(3) Condition (3) | 条件(4) Condition (4) | 参数 Parameters | 条件(1) Condition (1) | 条件(2) Condition (2) | 条件(3) Condition (3) | 条件(4) Condition (4) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| R_g | 3 | 4 | 3 | 3 | R_e | 1 | 1 | 1 | 1 |
| P_g | 1 | 1 | 1 | 1 | R_h | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C_g | 2 | 2 | 2 | 1 | L_h | 1 | 1 | 1 | 1 |
| d | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | P_h | 1 | 2 | 1 | 1 |
| s | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | x | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| C_h | 4 | 4 | 1 | 1 | y | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

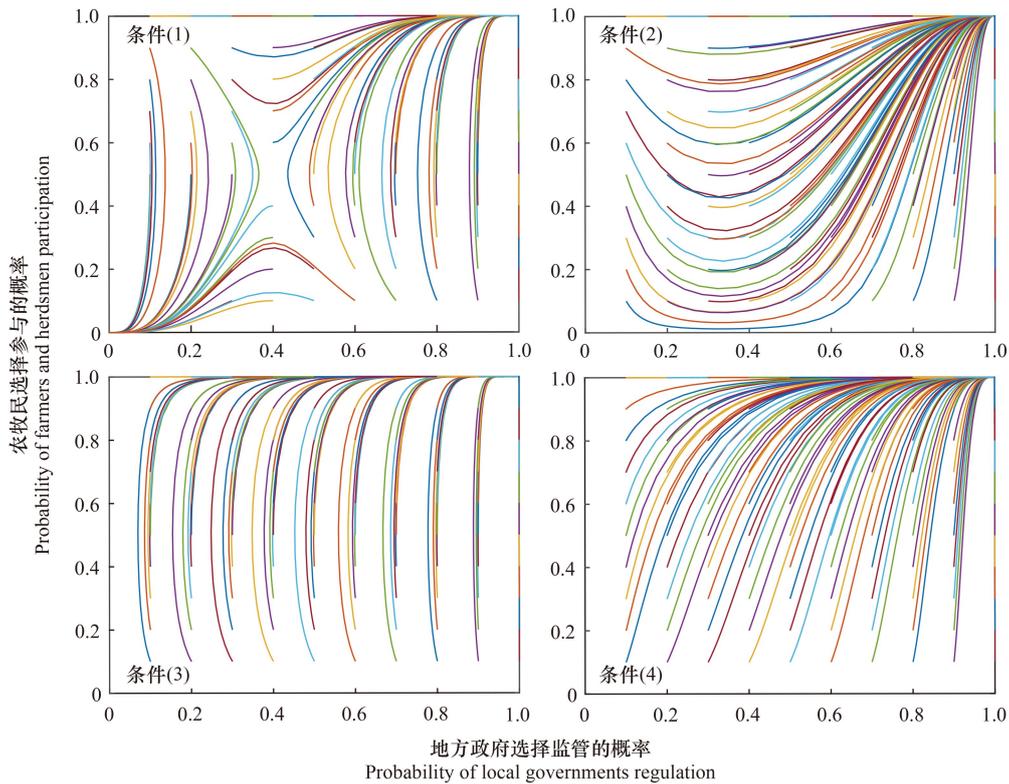


图 2 多情景下系统演化的稳定性

Fig.2 Stability of system evolution under multiple scenarios

3.2 敏感性分析

进一步通过 Matlab 仿真分析揭示高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理的演化博弈动态过程及相关影响因素的敏感性。此处重点关注具有政策意义的参数变化对演化博弈系统的影响。不失一般性地,本文基于条件(1)展开模拟分析,同样假设村镇基层政府选择监管策略的比例 x 为 0.6,农牧民选择参与策略的比例 y 为 0.5,其他参数如表 5 所示。设置模拟周期 t 为 20。

3.2.1 上级政府奖惩措施对系统演化的影响

如图 3 所示,上级政府奖励措施能够显著激励村镇基层政府积极参与村镇生活垃圾集中处理监管,且随

随着上级政府奖励(R_g)的增加,村镇基层政府监管的积极性更高,并间接促进农牧民积极参与生活垃圾集中处理。惩罚措施对系统演化存在影响受到惩罚方式的影响,在上级政府不断强化的牧区生态环境治理中,问责机制往往采用“一刀切”的方式,即无论村镇基层政府是否监管,只要农牧民不参与生活垃圾集中处理,则垃圾堆积、填埋和焚烧等分散处理方式引致环境问题势必导致村镇基层政府受到上级政府的问责;当不采用“一刀切”的方式,即当村镇基层政府不监管且农牧民不参与生活垃圾集中处理时,村镇基层政府才会受到问责,此时随着上级政府对村镇基层政府惩罚(P_g)的增加,村镇基层政府监管的积极性更高,并间接促进农牧民积极参与生活垃圾集中处理。

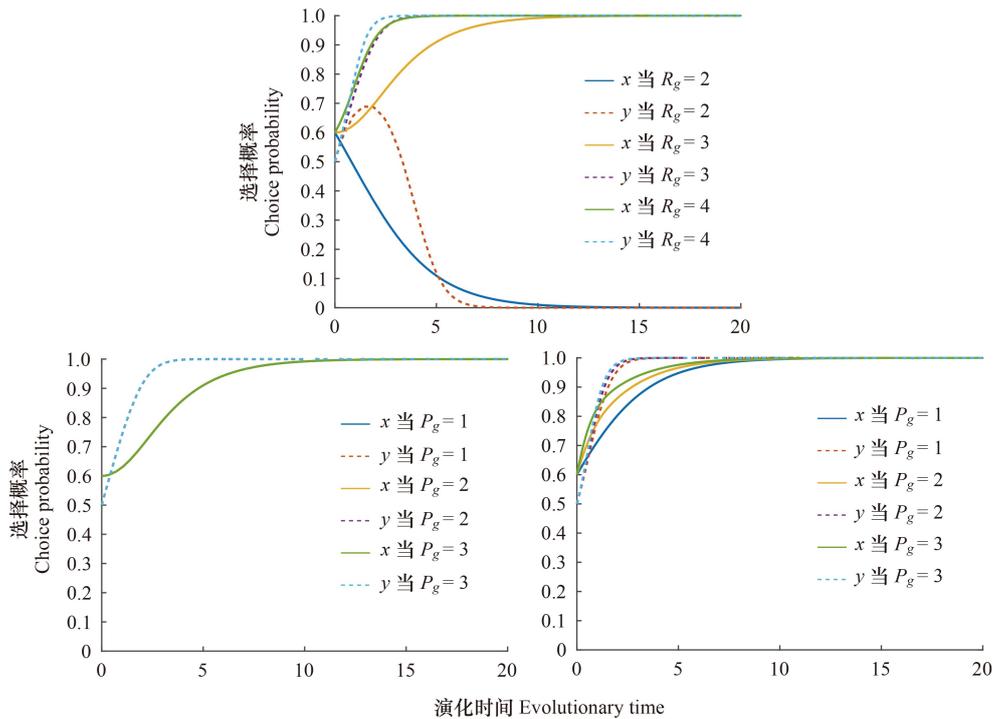


图3 上级政府奖惩措施对系统演化的影响

Fig.3 Effects of central government rewards and punishments on system evolution

R_g : 村镇基层政府受到上级政府的奖励; P_g : 村镇基层政府受到上级政府的惩罚

3.2.2 村镇基层政府奖惩措施对系统演化的影响

如图4所示,村镇基层政府奖惩措施对系统演化的影响较为显著。村镇基层政府的奖励措施(R_h)能够显著激励农牧民参与生活垃圾集中处理,但奖励本身构成村镇基层政府的监管成本的一部分,奖励过大时村镇基层政府就失去了监管的积极性,从而选择不监管策略,此时由于缺乏监管,农牧民将选择不参与生活垃圾集中处理。另一方面,村镇基层政府的惩罚措施(P_h)能够显著激励农牧民参与生活垃圾集中处理,当惩罚措施较小时,对农牧民不参与行为的约束性较小,此时村镇基层政府也缺乏监管的积极性,导致牧区生活垃圾治理监管无效。比较来看,奖励措施的敏感性小于惩罚措施的敏感性,而奖励措施对村镇基层政府和农牧民的影响方向相同,可见奖惩机制中惩罚的约束作用更为显著,一定程度的惩罚是有效推进牧区生活垃圾治理的必要措施。

3.2.3 宣传与设施建设措施对系统演化的影响

如图5所示,村镇基层政府的宣传(s)和设施建设(d)措施能够显著促进农牧民参与生活垃圾集中处理,宣传和设施建设需要成本,而这构成村镇基层政府监管的约束条件,宣传力度变化和生活垃圾集中处理设施密度对村镇基层政府监管行为影响的敏感度明显大于其对农牧民参与行为影响的敏感度。比较来看,宣传力

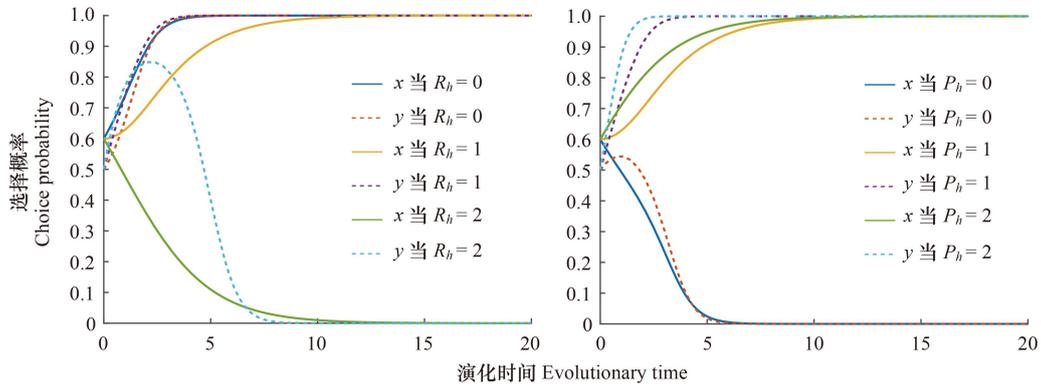


图 4 村镇基层政府奖惩措施对系统演化的影响

Fig.4 Influence of village and township grassroots government incentives and punishments on system evolution

R_h : 村镇基层政府对农牧民参与生活垃圾集中处理的奖励; P_h : 村镇基层政府对农牧民不参与生活垃圾集中处理的惩罚

度变化对农牧民行为影响的敏感度明显小于生活垃圾集中处理设施密度对农牧民行为影响的敏感度;对村镇基层政府行为的影响具有相似的特征。现实中,很多农牧民习惯性将生活垃圾堆放、掩埋或焚烧,只有集中处理足够便捷,他们才具有参与的积极性,而这与设施建设密度与便捷程度直接相关;宣传措施具有锦上添花的作用。可见推进高寒生态脆弱区农牧民参与生活垃圾集中处理,更直接有效的方式是完善设施建设,在成本适宜且效益最大化的基础上提高垃圾集中站点密度和转运频率能够提高垃圾收集率。

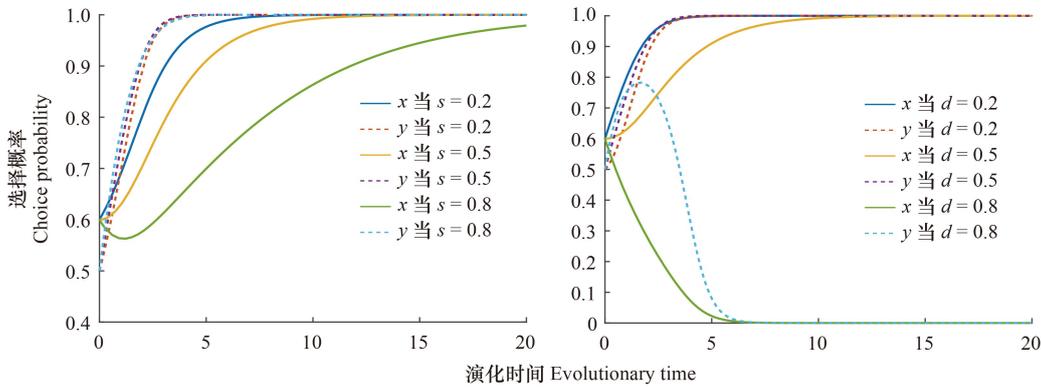


图 5 宣传与设施建设措施对系统演化的影响

Fig.5 Effects of publicity and facility construction measures on system evolution

s : 垃圾集中处理政策的宣传强度; d : 垃圾处理设施的建设密度

4 结论与启示

4.1 结论

生活垃圾治理是青藏高原农牧区人居环境的突出短板,其不当处理极易加剧生态系统退化风险。因此厘清农牧区生活垃圾集中处理的多主体互动机制及演化博弈的稳定性,可为高寒生态脆弱区对落实生活垃圾集中处理、降低生态风险和提升人居品质提供科学依据。在充分考虑政府和农牧民在不同策略下各自成本和收益的基础上,基于藏北牧区的案例,构建村镇基层政府和农牧民参与的演化博弈模型,通过数值模拟探究高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理的治激励机制。研究结论如下:

- (1) 在满足一定条件时,可以得到 $E_1(0,0)$, $E_2(0,1)$, $E_3(1,0)$ 和 $E_4(1,1)$ 四个稳定均衡策略,在高寒生态

脆弱区生活垃圾集中处理最容易出现的情形有三种:村镇基层政府不监管且农牧民不积极参与生活垃圾分类与集中处理;村镇基层政府监管但农牧民不积极参与,此时监管无效;村镇基层政府监管且农牧民积极参与,此时监管有效。

(2)奖惩机制作为一种应对市场失灵和社会失灵的机制,能够有效促进高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理。上级政府奖励措施能够显著激励村镇基层政府积极参与生活垃圾集中处理监管,对村镇基层政府的“一刀切”式惩罚措施的惩罚效果有限,针对村镇基层政府不作为性的惩罚措施具有更好的惩罚效果。村镇基层政府对农牧民的奖惩措施能够显著激励农牧民参与生活垃圾集中处理,奖惩机制中惩罚的约束作用更为显著,一定程度的惩罚是有效推进生活垃圾治理的必要措施。

(3)村镇基层政府的宣传和设施建设措施能够显著促进农牧民参与生活垃圾集中处理。村镇基层政府开展宣传教育和完善设施建设需要投入一定成本,而这构成村镇基层政府监管的约束因素,宣传力度变化和生活垃圾集中处理设施密度对村镇基层政府监管行为影响的敏感度明显大于其对农牧民参与行为影响的敏感度。完善设施建设是促进高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理的关键措施。

本研究综合考虑政府激励措施和农牧民的成本收益,将村镇基层政府和农牧民整合为一个复杂的系统,通过模拟村镇基层政府激励、农牧民生活垃圾集中处理行为的动态演化,探索了高寒生态脆弱区农牧民生活垃圾集中处理的激励机制,所得结论对优化村镇生活垃圾集中处理政策具有重要启示意义。但本文也存在一定局限性,在高寒生态脆弱区生活垃圾集中处理的复杂系统中,除了村镇基层政府以外,企业可能是另一种重要的第三方治理主体,尤其在服务型政府建设中,越来越多的政府非核心职能开始市场化,通过市场主体介入生活垃圾治理是未来的发展方向,也是高寒生态脆弱区生活垃圾治理研究一个新视角,后续研究应进一步关注第三方治理企业及其对村镇生活垃圾治理效能的影响。

4.2 政策启示

本文在科学认知高寒生态脆弱农牧区生活垃圾治理能力不足问题的基础上,紧扣高寒生态脆弱区域人居环境整治的现实需求,以寻找区域内部要素配置与主体协同的机制为重点,进一步构建了一个包含村镇基层政府和农牧民两方利益相关者群体参与的生活垃圾集中处理框架(图6)。在这一框架中,村镇基层政府应对市场失灵、社会失灵,以防止社会自我调节机制造成的负外部性危害,尤其在藏北牧区农牧民参与意愿不足的情况下,村镇基层政府通过奖惩机制、基础设施建设和宣传教育等方式激励农牧民参与生活垃圾集中处理十分必要;此外,对藏北高寒生态脆弱农牧区而言,居民点分散严重制约着生活垃圾治理,政府权衡财政约束的情况下优化软硬件设施配置和收转运体系则十分关键,这是支撑农牧民参与生活垃圾治理的基础。而农牧民

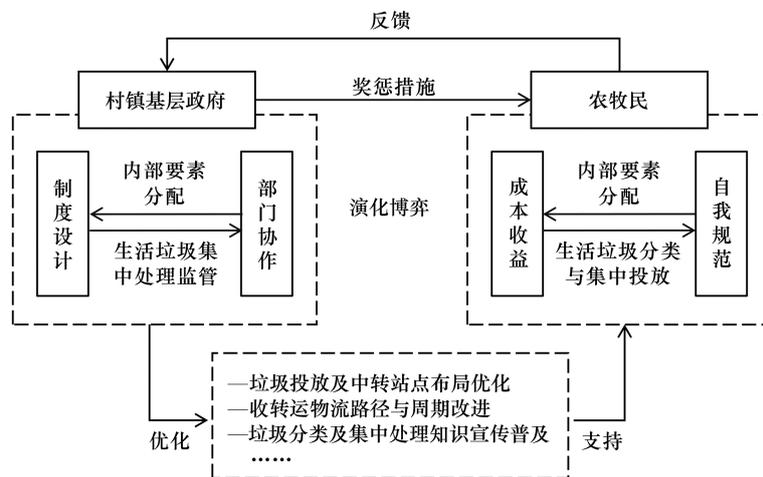


图6 农牧民生活垃圾集中处理的协同模式

Fig.6 A synergistic model for the centralized treatment of farmers' and herdsmen' domestic waste

在村镇基层政府激励措施及完善的软硬件设施所带来的益处中形成垃圾分类与集中处理的习惯,并逐步形成主观规范,同时在有机整合利益相关者参与过程中逐步形成生活垃圾的治理协同体系。

基于这一协同模式并结合本研究分析,可以得到如下政策启示:

(1) 优化高寒生态脆弱区域生活垃圾集中处理设施的规划建设和运维管理。一方面,要结合青藏高原气候高寒特征研发推广适用于高海拔低氧条件的环保技术,提高垃圾处理效率和资源回收率;另一方面,要针对青藏高原居民点分散的特征,综合考虑实现处理设施空间布局的最大居民点覆盖和最小转运成本,灵活配置固定和弹性转运方式,实现垃圾跨区转运与就地消纳并举。

(2) 加强村镇基层政府参与生活垃圾治理的检查评估和行政管理。一方面,实施第三方检查评估,将垃圾分类工作纳入各区、县级市政府高质量发展评价内容,并将其作为机关单位年度绩效考核内容,推动垃圾分类责任落实。另一方面,对于村镇基层政府中垃圾分类工作表现优秀的单位和个人,应该予以一定的激励措施,如奖金、荣誉称号等,调动基层政府工作人员参与治理的积极性。

(3) 完善农牧区农牧民参与生活垃圾治理的激励约束机制。一方面,利用驻村工作队、第一书记等力量,开展垃圾分类宣传教育,引导居民按照干湿分离、可回收不可回收等原则进行分类投放。另一方面,实行乡村垃圾集中处理积分兑换管理办法,对参与垃圾分类及集中处理的居民给予治理工作补贴、农牧产品收购补贴、垃圾治理积分兑换等多项奖励措施。

参考文献(References):

- [1] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 樊杰, 王小丹, 郑华, 赵文武, 吴飞. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. 中国科学院院刊, 2021, 36(11): 1298-1306.
- [2] 樊杰, 徐勇, 王传胜, 牛亚菲, 陈东, 孙威. 西藏近半个世纪以来人类活动的生态环境效应. 科学通报, 2015, 60(32): 3057-3066.
- [3] 鲍超, 刘若文. 青藏高原城镇体系的时空演变. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1330-1340.
- [4] 周侃, 张健, 樊杰, 徐勇. 青藏高原农牧区生活垃圾治理水平的地域分异与影响因素研究——以青海省 4315 个行政村为例. 环境科学学报, 2022, 42(11): 482-492.
- [5] Li Y Y, Wang L G, Liu G, Cheng S K. Rural household food waste characteristics and driving factors in China. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 164: 105209.
- [6] Luo Y, Wu L P, Huang D, Zhu J F. Household food waste in rural China: a noteworthy reality and a systematic analysis. Waste Management & Research: the Journal for a Sustainable Circular Economy, 2021, 39(11): 1389-1395.
- [7] 李再兴, 秦学, 李贵霞, 钟为章, 刘春, 李宁, 陈晓轩, 杨景亮. 农村生活垃圾源头分置、分类处理方法研究. 环境工程, 2014, 32(8): 85-88.
- [8] Memon M A, Imura H, Shirakawa H. Reforms for managing urban environmental infrastructure and services in Asia. The Journal of Environment & Development, 2006, 15(2): 138-157.
- [9] Yuan Z W, Zhang L J, Zhang B, Huang L, Bi J, Liu B B. Improving competitive advantage with environmental infrastructure sharing: a case study of China-Singapore Suzhou Industrial Park. International journal of environmental research, 2010, 4(4): 751-758.
- [10] 陈友媛, 王报英, 魏来, 孙萍, 夏训峰. 青岛农村生活垃圾填埋污染控制及资源利用过程的环境影响评价. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2019, 49(7): 85-93.
- [11] 屈言, 蒋凡, 唐新宇, 宁雪羽. 花果村新农村建设过程对生态环境的影响. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(S1): 516-518.
- [12] 黄季焜, 刘莹. 农村环境污染情况及影响因素分析——来自全国百村的实证分析. 管理学报, 2010, 7(11): 1725-1729.
- [13] 李丹, 陈冠益, 马文超, 段宁. 中国村镇生活垃圾特性及处理现状. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4187-4197.
- [14] 贾亚娟, 赵敏娟, 夏显力, 姚柳杨. 农村生活垃圾分类处理模式与建议. 资源科学, 2019, 41(2): 338-351.
- [15] 张健, 周侃, 陈好凡. 青藏高原生态屏障区生活垃圾治理生态环境风险及应对路径——以青海省为例. 生态学报, 2023, 43(10): 4024-4038.
- [16] 韩智勇, 旦增, 孔垂雪. 青藏高原农村固体废物处理现状与分析——以川藏 5 个村为例. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 451-457.
- [17] 苟帅, 魏海英, 朱晓明. 高原农村生活垃圾综合治理工程对策研究——以云南省迪庆藏族自治州为例. 中国资源综合利用, 2021, 39(11): 35-37, 41.

- [18] 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. *资源科学*, 2020, 42(12): 2370-2381.
- [19] 贾亚娟, 赵敏娟. 环境关心和制度信任对农户参与农村生活垃圾治理意愿的影响. *资源科学*, 2019, 41(8): 1500-1512.
- [20] Hu S, He J X. The willingness to household waste disposal practices of residents in rural China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2022, 24(3): 1124-1133.
- [21] 苏敏, 冯淑怡, 陆华良, 樊鹏飞. 农户参与农村生活垃圾治理的行为机制——基于大五人格特质的调节效应. *资源科学*, 2021, 43(11): 2236-2250.
- [22] Liu R. Farmers' household waste disposal behavior and its influencing factors in developing countries: evidence from Jiangsu, China. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(4): 8737-8748.
- [23] Wang F, Cheng Z H, Reisner A, Liu Y. Compliance with household solid waste management in rural villages in developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 293-298.
- [24] 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. *中国农村观察*, 2020(2): 16-33.
- [25] 魏夕凯, 马本. 农村生活垃圾分类治理的奖惩激励机制——基于复杂网络演化博弈模型. *中国环境科学*, 2022, 42(8): 3822-3831.
- [26] 肖卫, 朱有志. 合约基础上的农村公共物品供给博弈分析: 以湖南山区农村为例. *中国农村经济*, 2010(12): 26-36.
- [27] Sun Y, Liu B Y, Fan J, Qiao Q. The multi-player evolutionary game analysis for the protective development of ecotourism. *Environmental Science & Policy*, 2021, 126: 111-121.
- [28] 杜元伟, 孙浩然, 王一凡, 万骁乐. 海洋牧场生态安全监管的演化博弈模型及仿真. *生态学报*, 2021, 41(12): 4795-4805.
- [29] 潘鹤思, 柳洪志. 跨区域森林生态补偿的演化博弈分析——基于主体功能区的视角. *生态学报*, 2019, 39(12): 4560-4569.
- [30] 孙勇, 郭锐, 刘汉初, 张思慧, 孙中瑞. 青藏高原过度放牧与草地退化治理的演化博弈. *科技促进发展*, 2022, 18(5): 665-673.
- [31] Sun Y, Du H Y, Liu B Y, Kanchanarook Y, Zhang J F, Zhang P. Evolutionary game analysis for grassland degradation management, considering the livelihood differentiation of herders. *Land*, 2022, 11(10): 1776.
- [32] Tian M L, Zheng Y Y, Sun X L, Zheng H C. A research on promoting chemical fertiliser reduction for sustainable agriculture purposes: evolutionary game analyses involving 'government, farmers, and consumers'. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109433.
- [33] Teng Y, Lin P W, Chen X L, Wang J L. An analysis of the behavioral decisions of governments, village collectives, and farmers under rural waste sorting. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 95: 106780.