



尹士, 胥娟. 农村分布式光伏产业多元主体协同发展机制: 基于演化博弈视角[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(03): 266-279.

YIN Shi, XU Juan. Collaborative development mechanism of multi-subject entities in rural distributed photovoltaic industry: From an evolutionary game perspective[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(03): 266-279.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.03.21

农村分布式光伏产业多元主体协同发展机制： 基于演化博弈视角

尹士^{1,2} 胥娟¹

(1. 河北农业大学 经济管理学院, 河北 保定 071000;
2. 河北农业大学 人文社会科学学院, 河北 保定 071000)

摘要 为探究政府、光伏企业与农村居民三方主体间博弈关系, 本研究构建演化博弈模型并开展数值仿真, 揭示农村分布式光伏产业多元主体协同发展机制。研究表明: 1) 光伏企业光伏技术创新投入越充分, 积极参与分布式光伏安装意愿越强, 系统越加速趋于稳定均衡, 提升多元主体协同发展效率; 2) 政府税收优惠与绿色积分激励对促进三方合作具有显著推动作用, 税收优惠会降低光伏企业光伏技术创新边际成本, 过度优惠会削弱政府规制动能, 积分奖励政策对农村居民呈现明显“响应阈值效应”; 3) 惩罚机制需构建“制度约束—技术突破—社会监督”良性演化机制, 梯度化、信用挂钩及分阶段差异化惩罚有利于强化“监管+激励”双重作用; 4) 声誉收益对光伏企业积极协同参与产生正向激励作用, 影响政府对其政策倾斜及农户信任预期。本研究为厘清农村分布式光伏产业发展的动力机制与协同策略提供了政策启示。

关键词 农村能源; 分布式光伏; 多元主体; 演化博弈

中图分类号 F323.214

文章编号 1007-4333(2026)03-0266-14

文献标志码 A

Collaborative development mechanism of multi-subject entities in rural distributed photovoltaic industry: From an evolutionary game perspective

YIN Shi^{1,2}, XU Juan¹

(1. College of Economics and Management, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China;

2. College of Humanities and Social Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract To investigate the evolutionary game relationships among the, government, photovoltaic (PV) industry and rural residents, this study constructs an evolutionary game model and conducts a numerical simulations to reveal the collaborative development mechanisms of multi-actor systems in the rural distributed PV sector. The findings are as follows: 1) The more sufficient the investment in PV technology innovation by enterprises, the stronger their willingness to actively participate in distributed PV installation, accelerating the system's stabilization toward equilibrium and enhancing the efficiency of multi-actor coordination. 2) Government incentives, such as tax benefits and green credit rewards, significantly promote tripartite cooperation. Tax incentives can lower the marginal cost of enterprise innovation but excessive subsidies may weaken the government's regulatory momentum. Green credit rewards exhibit a notable "response threshold effect" among rural residents. 3) The penalty system should establish a virtuous evolutionary mechanism of institutional

收稿日期: 2025-05-07; 接受日期: 2025-07-15

基金项目: 国家社会科学基金项目(22CJY043)

第一作者: 尹士(ORCID:0000-0001-6885-7412), 教授, 主要从事农村发展研究, E-mail: shyshi0314@163.com

constraints-technological breakthroughs-social supervision". The gradient-based, credit-linked, and phased differentiated penalties are conducive to strengthening the dual roles of both regulation and incentive.

4) Reputation benefits provide positive incentives for PV enterprises to participate in collaborative development, which influence government policy preferences and shape the trust expectations of rural households. This study offers policy insights into clarifying the driving mechanisms and collaborative strategies for the development of rural distributed PV industries.

Keywords rural energy; distributed photovoltaic; multi-actor; evolutionary game

“双碳”目标下,我国积极推动清洁能源在农村地区布局与应用。然而,当前我国农村地区仍依赖高污染传统能源,特别是北方地区,清洁能源转型进程整体滞缓^[1]。作为主要可再生能源类型,太阳能开发与利用在“整县推进屋顶分布式光伏”战略中日益凸显其战略地位与综合效益^[2]。在分布式光伏产业发展中,政府政策支持与顶层设计是关键驱动力。杭州市萧山区益农镇群围村通过政企村多方联动,探索出“村企合作、村民共享、村域共富”分布式光伏产业发展路径,安装光伏农户每年可享受3 000度免费用电,同时萧山区政府也对分布式光伏项目给予0.2元/(kW·h)补贴。这有效降低了项目投资风险,提升了村集体与农户参与的积极性。2022年6月,国家发展改革委、国家能源局等9部门联合印发的《“十四五”可再生能源发展规划》提出“大力推进风电、光伏等分布式发电开发”;2025年2月,国家能源局印发的《2025年能源工作指导意见》明确,非化石能源发电装机容量占比需提升至约60%,非化石能源在一次能源消费中的占比提高至约20%。2025年中央一号文件提出,要强化农村分布式可再生能源开发,促进农村地区绿色生产方式和绿色消费模式的普及与转型。2025年1月国家能源局印发的《分布式光伏发电开发建设管理办法》指出,分布式光伏等新能源已全面进入平价上网、无补贴、市场主导的发展新阶段。这有效激发了光伏企业光伏技术创新动力,政策导向与市场机制协同作用,为农村分布式光伏推广奠定了坚实基础。

当前分布式光伏产业发展面临光伏技术知晓度低、光伏企业运维服务体系不完善、政府政策连续性不足等多重挑战,产业发展多元主体间策略失衡,直接影响项目运营效率与可持续发展能力。因此,构建“政府-光伏企业-农村居民”三方协同机制,成为破解农村分布式光伏产业发展瓶颈的关键路径。学者们从不同角度进行了研究。从光伏产业

发展现状上看,李钟实^[3]认为随着储能技术发展,光伏发电成本逐渐降低,安装分布式光伏有利于提高村民收入。从政策补贴角度看,Simpson等^[4]认为经济激励措施有一定效果,并且安装分布式太阳能系统是受经济激励措施刺激,而不是对技术本身效益的理解,在未来无法获得奖励时,人们可能会不安装太阳能系统。李纪珍等^[5]认为补贴退坡从整体层面激发了产业内企业逆势加大研发投入意愿。廖茂林等^[6]认为随着清洁能源技术进步和市场占比增加,政策开始鼓励市场驱动清洁能源发展,逐渐向市场化机制过渡。在应用研究方面,众多学者关注分布式光伏在不同场景下实际应用效果和优化策略^[7-10]。有研究探讨了分布式光伏在农村地区推广应用模式和效益评估,分析了其对农村经济发展和能源消费结构优化促进作用^[11]。此外,还有研究关注分布式光伏与其他能源技术集成应用,提高能源利用效率和系统稳定性^[12]。

在农村清洁能源利用和环境整治相关问题上,学者们利用演化博弈思想进行了研究。廖卫东等^[13]采用博弈分析方法对村落农户之间、地方政府与农户之间以及中央与地方政府之间互动进行了分析,考察了我国农村人居环境污染治理制度安排。在以政策与绿色技术创新为主体演化博弈研究中,Li等^[14]研究了微电网并网在政府奖惩机制下演化博弈,揭示了政策对微电网发展的影响。Zhang等^[15]研究了政府和企业间动态互动,借助政策模拟与演化博弈方法深入探讨了环境规制促进绿色技术创新内在机制。Qian等^[16]从政府与高能耗企业博弈视角出发,对环境规制与绿色技术创新关系展开分析,政府适度监管与企业创新激励间需达成平衡。Bu等^[17]基于前景理论研究PPP项目中政府与公众协同推进绿色技术创新模式,强调了考虑主体有限理性及风险偏好对实现环境治理目标的重要意义。利用演化博弈方法对环境治理方面研究日益增多,演化博弈研究也正在逐渐扩展

其研究主体的范围。罗福周等^[18]建立了政府、社会资本方及公众三方博弈模型,降低政府、农户和企业的成本、补偿农户损失、强化对排污的监督与惩罚,有助于促进生态环境有效治理。Qi等^[19]探讨了企业与政府、消费者等利益相关者互动策略,政府政策支持、消费者绿色偏好以及企业创新能力和成本控制是实现绿色转型的关键因素。

综上所述,当前研究对分布式光伏产业中多元主体协同机制系统建模与动态演化分析仍相对薄弱,缺乏深入探讨其博弈关系与协同演化路径的理论研究与实践支撑。农村分布式光伏产业多元主体利益协同与风险共担机制对构建可持续发展的分布式光伏产业生态具有关键作用。三方主体决策受政策、技术、社会观念等多因素影响,且存在显著时间滞后性,针对农村主体信息获取能力弱、决策依赖经验特点,采用演化博弈理论替代传统完全理性模型,更真实地刻画出“非完全理性、动态适应、群体互动”决策过程,为分析三方协同合理性提供更贴近现实的理论工具。

本研究拟构建涵盖政府、光伏企业与农村居民三方行为主体演化博弈模型,系统引入政府规制强度、企业声誉收益等关键参数变量,借助雅可比矩阵分析系统局部稳定性,并通过参数敏感性分析探讨制度因素对演化路径影响机制。同时,结合政策工具组合与光伏技术创新要素配置,构建协同治理分析框架,以期为推动农村分布式光伏在多元主体参与下协同发展机制优化提供理论支撑与政策参考。

1 农村分布式光伏产业利益相关者分析

农村分布式光伏产业发展本质在于构建多元主体协同共治的生态系统。本研究将农村分布式光伏产业核心主体界定为具有利益关系的三方主体,即承担制度供给与市场规制的政府、实施技术创新与运营服务的光伏企业和作为终端用户与价值共创者的农村居民,三者通过利益联结与风险共担机制形成动态治理网络^[1]。

政府在分布式光伏产业发展中具有制度供给和监管规制的双重职能。一方面,政府建立包含财税激励、技术标准、环境规制在内的立体化制度框架,运用动态契约机制协调光伏企业技术创新与农户采纳意愿间时序错配问题。另一方面,构建包含信息公示、质量追溯、信用评价的全周期监管体系,

有效防控市场主体机会主义行为。政府不仅需要平衡短期政策效力与长期市场培育关系,更需关注政策工具与农村社会资本特质适配性^[14]。光伏企业作为技术载体与市场枢纽,其战略选择呈现双重属性。光伏企业通过技术升级提升系统效率,开发适应农村用能场景的智能微网解决方案,降低全生命周期成本^[5]。此外,光伏企业也要构建包含安装服务、运维保障、收益分成的服务生态系统,实现商业价值与社会价值协同创造。这就要求企业超越传统供应商角色,向能源服务集成商转型,其核心竞争力体现在技术适配能力与社区嵌入深度的有机统一。农村居民角色认知正经历从被动接受者向主动参与者的范式转变,一是,分布式光伏通过多能互补与智能调控,实现能源自主性与经济性的双重提升;二是,政策工具创新将生态价值转化为可量化经济收益,形成环境改善与收入增长正向循环;三是,社区治理机制重构赋予农户在项目决策、收益分配等环节实质性话语权。综上所述,三方主体参与动机行为选择图,如图1所示。

2 基本假设与参数设定

2.1 基本假设

假设1:农村分布式光伏产业发展中,政府、光伏企业与农村居民构成战略共同体。在演化过程中,主体决策遵循利益最大化原则,通过策略试错与经验学习实现群体行为演化,且系统动态受制度环境与技术经济参数双重约束^[20]。研究重点刻画分布式光伏产业发展机制动态适配过程,为破解“政策依赖-技术锁定-参与不足”三重困境提供参考。

假设2:在农村分布式光伏产业发展中,政府、光伏企业、农村居民三方主体策略集分别为{积极规制,消极规制}、{积极参与,消极参与}、{安装,不安装}。

假设3:政府选择积极规制农村分布式光伏产业发展概率为 x ,则选择消极概率为 $1-x$;光伏企业选择积极参与与分布式光伏安装概率为 y ,则选择消极概率为 $1-y$;农村居民选择安装分布式光伏概率为 z ,则选择不安装概率为 $1-z$,其中 $x, y, z \in [0, 1]$ 且都与时间 t 有关。

2.2 参数设定

2024年2月,国家发展改革委和国家能源局在《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》中指



图1 农村分布式光伏产业发展中政府-光伏企业-农村居民的演化博弈分析

Fig. 1 Evolutionary game analysis of government-photovoltaic enterprises-rural residents in the development of rural distributed photovoltaic industry

出,“加快推进农村电网巩固提升工程,完善农村电网网架结构,加强县域电网与主网联系,稳妥推进大电网延伸覆盖,因地制宜建设可再生能源局域网”。作为“全国第一个光伏村”,李岙村成功实践离不开多方协同发力。宁波市区两级政府联合属地乡镇及电力部门,构建起“政策激励+规划统筹”的支持体系。分布式光伏技术创新已成为产业升级内在需求,更从侧面凸显了政府在推动电网适应性提升过程中所肩负的系统性治理责任。祁阳市茅竹镇幸福村给安装分布式光伏且电站并网后的农户给予积分奖励,提升了农户参与积极性与获得感。祁阳市通过政府引导、企业参与、积分激励等一系列措施,推动了分布式光伏在农户中广泛应用。借鉴上述政策和现实案例,本研究作出如下设计:

政府发展分布式光伏产业基础收益为 G ,政府付出电网基本运行成本为 C_1 ,政府为光伏企业积极参与时付出电网运行和改造成本为 C_2 。 T_1 为政府给光伏企业积极参与时税收优惠, T_2 为政府支付给农村居民安装分布式光伏时绿色积分奖励。 S 为农村居民安装分布式光伏且光伏企业积极参与时,政府获得的社会效益,如 CO_2 排放量减少、政府公信力提升等。

光伏企业选择积极参与时,则会开展光伏技术创新活动;光伏企业选择消极参与时,则不会开展光伏技术创新活动,使用现有光伏产品。光伏企业技术创新水平 α 不仅体现在研发更高效的光伏电池

技术,提升光电转换效率,降低发电成本上,运用物联网、大数据、人工智能等技术降低运维成本。当光伏企业消极参与时,获得的收益为 F_1 ,付出的成本为 P_1 。光伏企业积极参与时,除了获得 F_1 基础收益,还可以获得增量收益为 F_2 ,同时产生增量成本 P_2 ,二者均与 α 呈正相关。农村居民安装分布式光伏时,光伏企业积极参与还可以获得良好声誉 R ,在政府积极规制而光伏企业消极参与时,光伏企业要支付政府罚款 M 。

农村居民安装分布式光伏时获得收益为 Q_1 ,包括“余电上网”经济收益^[21]和环境改善等社会效益,同时产生成本 H_1 ,包括光伏板日常检查的时间成本和安装光伏板产品成本等。农村居民不安装分布式光伏获得收益为 Q_2 ,与安装分布式光伏系统相比,未参与安装的农村居民在一定程度上规避了由政策不确定性所引发的潜在经济风险。农村居民不安装分布式光伏成本为 H_2 ,包括失去补贴与电价收益、空气污染和日常用电成本等。 L 为政府积极规制时,农村居民安装分布式光伏而光伏企业消极参与时,政府对农村居民监督奖励。农村居民安装分布式光伏净收益大于不安装分布式光伏净收益,即 $Q_1 - H_1 > Q_2 - H_2$ 。

在条件假设基础上,模型参数设定如表1所示。

根据上述假设及参数设定,三方利益主体博弈支付矩阵,如表2所示。

表1 博弈系统参数设定

Table 1 Game system parameter settings

参数 Parameter	含义 Connotation	参数 Parameter	含义 Connotation
G	政府获得的基础收益	F_2	光伏企业积极参与时获得的增量收益
C_1	政府付出的电网运行成本	P_1	光伏企业消极参与时付出的成本
C_2	光伏企业积极参与时,政府付出的成本	P_2	光伏企业积极参与时付出的额外成本
M	光伏企业消极参与时,政府给予光伏企业的罚款	R	光伏企业积极参与且农村居民安装分布式光伏时,光伏企业获得的声誉
S	农村居民安装分布式光伏且光伏企业积极参与时,政府获得的社会效益	Q_1	农村居民安装分布式光伏时的收益
T_1	光伏企业积极参与时收到的税收优惠	H_1	农村居民安装分布式光伏时的成本
T_2	农村居民安装分布式光伏时收到政府给予的绿色积分奖励	Q_2	农村居民不安装分布式光伏时获得的收益
α	光伏企业光伏技术创新投入强度	H_2	农村居民不安装分布式光伏时付出的成本
F_1	光伏企业消极参与时获得的基础收益	L	政府积极规制时,政府对农村居民的监督奖励

表2 农村分布式光伏产业发展的三方博弈支付矩阵

Table 2 Payment matrix of the three-party game regarding the development of the rural distributed photovoltaic industry

策略组合 Strategy combination	政府 Government	光伏企业 Photovoltaic enterprises	农村居民 Rural residents
(积极规制,积极参与,安装) (Positive regulation, active participation, installation)	$G+S-C_2-T_1-T_2$	$F_1+\alpha F_2-P_1-\alpha P_2+T_1+R$	$Q_1-H_1+T_2$
(积极规制,积极参与,不安装) (Positive regulation, active participation, noinstallation)	$G-C_2-T_1$	$F_1+\alpha F_2-P_1-\alpha P_2+T_1$	Q_2-H_2
(积极规制,消极参与,安装) (Positive regulation, passive participation, installation)	$G-C_1-T_2+M-L$	F_1-P_1-M	$Q_1-H_1+T_2+L$
(积极规制,消极参与,不安装) (Positive regulation, passive participation, no installation)	$G-C_1+M$	F_1-P_1-M	Q_2-H_2
(消极规制,积极参与,安装) (Negative regulation, active participation, installation)	$G+S-C_2$	$F_1+\alpha F_2-P_1-\alpha P_2+R$	Q_1-H_1
(消极规制,积极参与,不安装) (Negative regulation, active participation, no installation)	$G-C_2$	$F_1+\alpha F_2-P_1-\alpha P_2$	Q_2-H_2
(消极规制,消极参与,安装) (Negative regulation, passive participation, installation)	$G-C_1$	F_1-P_1	Q_1-H_1
(消极规制,消极参与,不安装) (Negative regulation, passive participation, no installation)	$G-C_1$	F_1-P_1	Q_2-H_2

3 三方主体演化博弈模型

3.1 求解复制动态方程

政府平均期望收益为 E_1 ,光伏企业平均期望收益为 E_2 ,农村居民平均期望收益为 E_3 。

政府积极规制农村分布式光伏产业发展期望

收益函数为:

$$\begin{aligned} E_{11}= & (G-C_2-T_1-T_2+S)yz+ \\ & (G-C_2-T_1)(1-z)y+ \\ & (G-C_1-T_2+M-L)(1-y)z+ \\ & (G-C_1+M)(1-y)(1-z) \end{aligned} \tag{1}$$

政府消极规制农村分布式光伏产业发展期望

收益函数为：

$$E_{12} = (G - C_2 + S)y\bar{z} + (G - C_2)y(1 - \bar{z}) + (G - C_1)(1 - y)\bar{z} + (G - C_1)(1 - y)(1 - \bar{z}) \quad (2)$$

政府平均期望收益可表示为：

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

政府复制动态方程可表示为：

$$\begin{aligned} F(x) &= dx/dt = x(E_{11} - E_1) \\ &= x(1 - x)(E_{11} - E_{12}) \\ &= x(1 - x)[z(S - T_2) - T_1y - Ly + (M - L)(1 - y)] \end{aligned} \quad (4)$$

光伏企业积极参与时期望收益函数为：

$$\begin{aligned} E_{21} &= (F_1 + \alpha F_2 - P_1 - \alpha P_2 + T_1 + R)x\bar{z} + (F_1 + \alpha F_2 - P_1 - \alpha P_2 + T_1)(1 - \bar{z})x + (F_1 + \alpha F_2 - P_1 - \alpha P_2 + R)(1 - x)\bar{z} + (F_1 + \alpha F_2 - P_1 - \alpha P_2)(1 - x)(1 - \bar{z}) \end{aligned} \quad (5)$$

光伏企业消极参与时期望收益函数为：

$$\begin{aligned} E_{22} &= (F_1 - M - P_1)x\bar{z} + (F_1 - P_1 - M)(1 - \bar{z})x + (F_1 - P_1)(1 - x)\bar{z} + (F_1 - P_1)(1 - x)(1 - \bar{z}) \end{aligned} \quad (6)$$

光伏企业平均期望收益可表示为：

$$E_2 = yE_{21} + (1 - y)E_{22} \quad (7)$$

光伏企业复制动态方程可表示为：

$$\begin{aligned} F(y) &= dy/dt = y(E_{21} - E_2) \\ &= y(1 - y)(E_{21} - E_{22}) \\ &= y(1 - y)[T_1x + zR + \alpha(F_2 - P_2) + Mx] \end{aligned} \quad (8)$$

农村居民安装分布式光伏期望收益函数为：

$$\begin{aligned} E_{31} &= (Q_1 - H_1 + T_2)xy + (Q_1 - H_1 + T_2 + L)(1 - y)x + (Q_1 - H_1)(1 - x)y + (Q_1 - H_1)(1 - x)(1 - y) \end{aligned} \quad (9)$$

农村居民不安装分布式光伏期望收益函数为：

$$\begin{aligned} E_{32} &= (Q_2 - H_2)xy + (Q_2 - H_2)(1 - x)y + (Q_2 - H_2)(1 - y)x + (Q_2 - H_2)(1 - x)(1 - y) \end{aligned} \quad (10)$$

农村居民平均期望收益可表示为：

$$E_3 = zE_{31} + (1 - z)E_{32} \quad (11)$$

农村居民复制动态方程可表示为：

$$\begin{aligned} F(z) &= dz/dt = z(E_{31} - E_3) \\ &= z(1 - z)(E_{31} - E_{32}) \\ &= z(1 - z)[Q_1 - Q_2 + H_2 - H_1 + xL(1 - y) + T_2x] \end{aligned} \quad (12)$$

3.2 均衡点稳定性分析

基于三方主体复制动态方程构建雅可比矩阵，通过复制动态方程求均衡点，令式(4)、(8)和(12)等于零，即：

$$\begin{aligned} F(x) &= x(1 - x)[z(S - T_2) - T_1y - Ly + (M - L)(1 - y)] = 0 \\ F(y) &= y(1 - y)[T_1x + zR + \alpha(F_2 - P_2) + Mx] = 0 \\ F(z) &= z(1 - z)[Q_1 - Q_2 + H_2 - H_1 + xL(1 - y) + T_2x] = 0 \end{aligned}$$

可以得出8个纯策略均衡点，即 $W_1(0, 0, 0)$ ， $W_2(0, 0, 1)$ ， $W_3(0, 1, 0)$ ， $W_4(0, 1, 1)$ ， $W_5(1, 0, 0)$ ， $W_6(1, 1, 0)$ ， $W_7(1, 0, 1)$ ， $W_8(1, 1, 1)$ 。根据李雅普诺夫稳定性理论可知，若雅可比矩阵内部某均衡点的特征值 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 全为负数时，则该均衡点为演化稳定点(ESS)。为了研究系统的稳定性，将各均衡点带入雅可比矩阵 J 中得出相对应特征值，各个均衡点特征值如表3所示。

$$J = \begin{pmatrix} (1 - 2x)[z(S - T_2) - T_1y - Ly + (M - L)(1 - y)] & x(1 - x)(-T_1 - M) & x(1 - x)(S - T_2) \\ y(1 - y)(M + T_1) & (1 - 2y)[T_1x + zR + \alpha(F_2 - P_2) + Mx] & y(1 - y)R \\ z(1 - z)(T_2 - Ly + L) & z(1 - z)(-Lx) & (1 - 2z)[Q_1 - Q_2 + H_2 - H_1 + xL(1 - y) + T_2x] \end{pmatrix} \quad (13)$$

从上述假设可知，农村居民安装分布式光伏净收益大于不安装分布式光伏净收益，即 $Q_1 - H_1 > Q_2 - H_2$ ， $W_1(0, 0, 0)$ 、 $W_3(0, 1, 0)$ 和 $W_5(1, 0, 0)$ 、 $W_6(1, 1, 0)$ 均为不稳定点。 $W_2(0, 0, 1)$ 、 $W_4(0, 1, 1)$ 、 $W_7(1, 0, 1)$ 和 $W_8(1, 1, 1)$ 存在系统稳定性的可能。

当 $S - T_2 - L + M < 0$ 且 $\alpha(F_2 - P_2) + R < 0$ 时，系统存在唯一演化稳定点 $W_2(0, 0, 1)$ ，稳定策略为(消极规制，消极参与，安装)。此时，政府基于成本考量选择消极规制，光伏企业因创新效益低而维持现有技术，消极参与分布式光伏安装，居民选择安装

表3 系统均衡点及其特征值

Table 3 System equilibrium points and eigenvalues

均衡点 Balance point	特征值 λ_1 Eigenvalue λ_1	特征值 λ_2 Eigenvalue λ_2	特征值 λ_3 Eigenvalue λ_3
$W_1(0,0,0)$	$M-L$	$\alpha(F_2-P_2)$	$Q_1-Q_2+H_2-H_1$
$W_2(0,0,1)$	$S-T_2-L+M$	$\alpha(F_2-P_2)+R$	$-(Q_1-Q_2+H_2-H_1)$
$W_3(0,1,0)$	$-T_1-L$	$-\alpha(F_2-P_2)$	$Q_1-Q_2+H_2-H_1$
$W_4(0,1,1)$	$-T_1+S-T_2-L$	$-\alpha(F_2-P_2)-R$	$-(Q_1-Q_2+H_2-H_1)$
$W_5(1,0,0)$	$L-M$	$\alpha(F_2-P_2)+T_1+M$	$Q_1-Q_2+H_2-H_1+L+T_2$
$W_6(1,1,0)$	T_1+L	$-T_1-M-\alpha(F_2-P_2)$	$Q_1-Q_2+H_2-H_1+T_2$
$W_7(1,0,1)$	$-(S-T_2-L+M)$	$\alpha(F_2-P_2)+M+T_1+R$	$-(Q_1-Q_2+H_2-H_1+L+T_2)$
$W_8(1,1,1)$	T_1-S+T_2+L	$-T_1-M-\alpha(F_2-P_2)-R$	$-(Q_1-Q_2+H_2-H_1+T_2)$

分布式光伏。这主要得益于电价补贴、省电成本等直接经济收益,及前期政策形成行为惯性、现有技术稳定性。在电网改造后居民售电收益稳定、企业技术进入平台期地区,易出现 $W_2(0,0,1)$ 处均衡。此均衡虽能维持短期市场需求,但长期来看,政府监管缺位可能导致安装质量问题,光伏技术创新停滞也会制约技术升级,光伏企业消极参与分布式光伏安装。

当 $-T_1+S-T_2-L<0$ 且 $-\alpha(F_2-P_2)-R<0$ 时,系统存在唯一稳定演化均衡点 $W_4(0,1,1)$,稳定策略为(消极规制,积极参与,安装)。此时,政府消极规制农村分布式光伏产业发展,光伏企业会积极创新分布式光伏技术,积极参与分布式光伏安装,农村居民也会主动安装分布式光伏,这是农村分布式光伏产业发展理想状态。这表明政府通过前期激励政策和环保知识宣传等方式激发了光伏企业积极参与主动性。同样,农村居民在收到奖励后也切实地体会到了安装分布式光伏带来的好处,环保意识和绿色认知水平也得到很大提升。

当 $-(S-T_2-L+M)<0$ 且 $\alpha(F_2-P_2)+M+T_1+R<0$ 时,系统存在唯一稳定演化均衡点 $W_7(1,0,1)$,稳定策略为(积极规制,消极参与,安装)。政府基于社会综合效益最大化原则,通过出台政策、加强监管等积极规制手段,规范市场秩序、保障产业健康发展。但是,尽管面临政府规制与激励,光伏企业在综合评估参与投入产出比后,认为维持现有技术足以满足农村分布式光伏安装场景需求。例如,若当前技术已能适配大部分农村应用场景,且新技术研发周期长、投入大,光伏企业会选择优先保障短期利润,延缓创新步伐。此阶段,农村居民选择安装分布式光伏,主要受经济利益与政

策引导双重驱动。一方面,安装后可通过余电上网获取稳定收益;另一方面,政府激励政策与宣传推广,降低了安装门槛,增强了其参与意愿。

当 $T_1-S+T_2+L<0$ 且 $-T_1-M-\alpha(F_2-P_2)-R<0$ 时,系统存在唯一演化稳定点 $W_8(1,1,1)$,稳定策略为(积极规制,积极参与,安装)。此条件下,政府出台鼓励农村分布式光伏产业发展政策并积极监督,光伏企业和农村居民在良好政策驱动下,积极参与农村分布式光伏产业发展,此时是分布式光伏产业发展见效最快的一种策略。这时期政府积极进行政策宣传并出台激励政策促进农村分布式光伏市场发展,让光伏企业和农村居民得到实际优惠,从而主动参与其中,三方共同努力可以短期取得成效。

在“无补贴”政策背景下,市场机制尚不完善、制度环境仍处于演进阶段,若完全依赖市场主导实现自主发展,可能面临较高制度摩擦与系统性风险,亟需渐进式制度安排实现平稳过渡。本研究验证了策略组合 $W_8(1,1,1)$ 在当前阶段具有显著政策适配性。该均衡状态一方面有效避免了因政府过度干预而引发的财政支出压力,另一方面可规避因监管缺失可能导致的市场失灵问题,从而在保障系统稳定演化的同时,实现政策效能与治理成本间动态平衡。

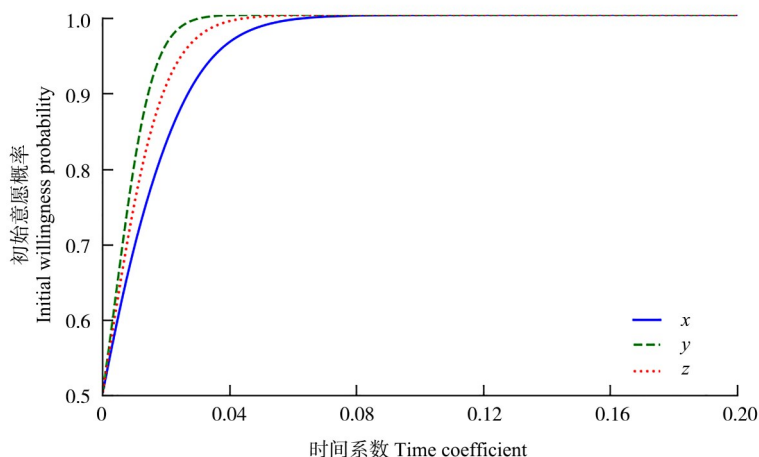
4 数值仿真分析

本研究基于 Python 平台进行数值仿真,验证演化稳定策略收敛有效性。为确保模型实验效度,本研究借鉴现实案例和学者们相关研究参数标定^[22-25],对参数做出如下假设: $G=300$, $C_1=100$, $C_2=180$, $M=100$, $S=250$, $T_1=80$, $T_2=60$, $F_1=100$, $F_2=120$, $P_1=50$, $P_2=80$, $R=40$, $Q_1=170$,

$H_1=80, Q_2=60, H_2=40, L=20, \alpha=0.2$ 。

根据图2所示演化趋势,在初始意愿均为0.5条件下,三方主体协同演化呈现阶段性特征。在初期合作阶段($0 \leq t < 0.04$),三方虽具备初始参与意愿,但尚未形成深度协同机制。此阶段政府主要通过税收优惠、规划引导等试探性政策推动项目落地,但因执行细则缺位与监管框架模糊,政策效能存在边际递减效应;光伏企业需承担设备适配农村地理环境高额调试成本,技术经济性尚未显现;农村居民此时因对分布式光伏了解不足,而持观望态度。在协同跃迁阶段($0.04 \leq t \leq 0.2$),三方主体通过动态调适实现效率提升,提升政府、

光伏企业与农村居民三方主体初始参与意愿,是推动分布式光伏产业实现创新发展与协同演化关键前提。初始意愿水平不仅直接影响策略选择演化路径和系统收敛速度,也关系到政策激励与市场响应间联动效率。具体而言,政府通过引入政策激励,为光伏企业提供稳定收益预期,降低政策波动风险,光伏企业依托技术创新,凭借高效组件、智能运维系统等显著降低边际成本,积极参与农村分布式光伏安装,农村居民深入了解分布式光伏技术且通过电费节省等可见性收益增多,逐步建立对分布式光伏信任,趋向于安装分布式光伏。



x, y, z 分别表示政府积极规制、光伏企业积极参与、农村居民安装的意愿概率。三方主体初始意愿概率均为0.5。
 x, y , and z represent the willingness probability of active regulation by the government, active participation by photovoltaic enterprises, and installation by rural residents, respectively. The initial willingness probability of the three parties all are 0.5.

图2 三方主体初始意愿对系统演化影响

Fig. 2 Impact of the initial willingness of the three parties on system evolution

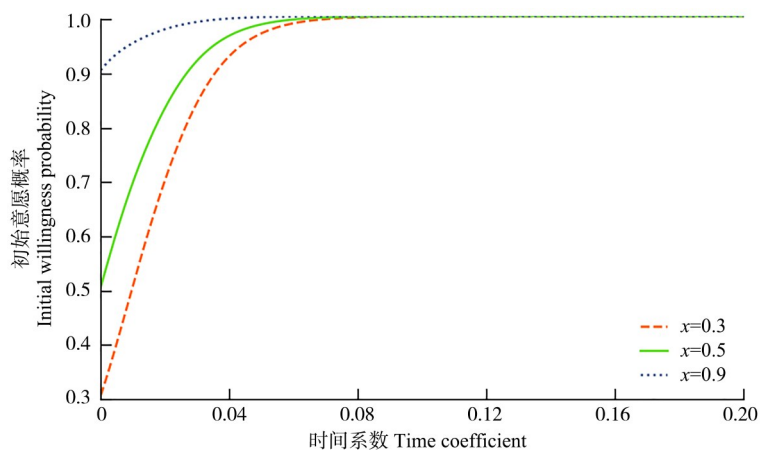
4.1 不同初始意愿对系统演化的影响

由图3可知,光伏企业和农村居民初始意愿不变,政府初始意愿分别设置为0.3、0.5、0.9时,无论政府初始意愿增强或削弱,系统演化最终均收敛于政府积极规制策略,同时,随着积极规制意愿增强,系统达到稳定状态速度越快。这一现象与无补贴背景下政府加速清洁能源布局趋势相匹配,凸显了“双碳”目标驱动下政策端前瞻性引导特征。虽然在现实中农村居民存在认知滞后,光伏企业存在技术水平更新较慢问题,但是政府仍会基于绿色发展和减排效益宏观评估,通过动态市场激励机制实施积极引导,促使分布式光伏产业发展。

由图4可知,政府和农村居民初始意愿不变,

光伏企业初始意愿分别设置为0.4、0.6、0.8时,随着时间推进,系统演化最终达到稳定状态,同时,随着光伏企业积极创新分布式光伏技术意愿增强,积极参与农村分布式光伏安装,系统达到稳定状态的速度越快。这一现象揭示了分布式光伏产业内在韧性,面对初期市场认知不足或政策环境波动,行业仍能通过技术升级与模式创新,持续向更优均衡状态演进,印证了其在能源转型中的战略价值。

由图5可知,政府和光伏企业初始意愿不变,农村居民初始意愿分别设置为0.2、0.5和0.8,在农村居民初始意愿较低时,演化趋势中达到稳态速度最慢。这揭示了农村居民绿色认知水平对分

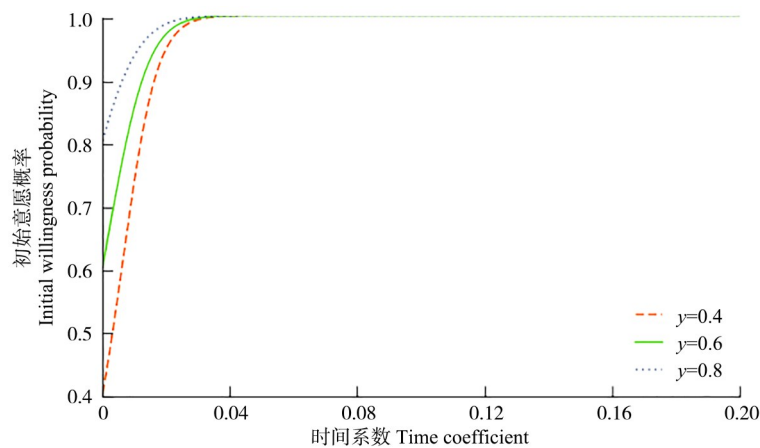


x 表示政府积极规制的初始意愿概率。

x represents the initial willingness probability of active regulation by the government.

图3 不同政府初始意愿对系统演化影响

Fig. 3 Impact of different governments' initial policy willingness on system evolution

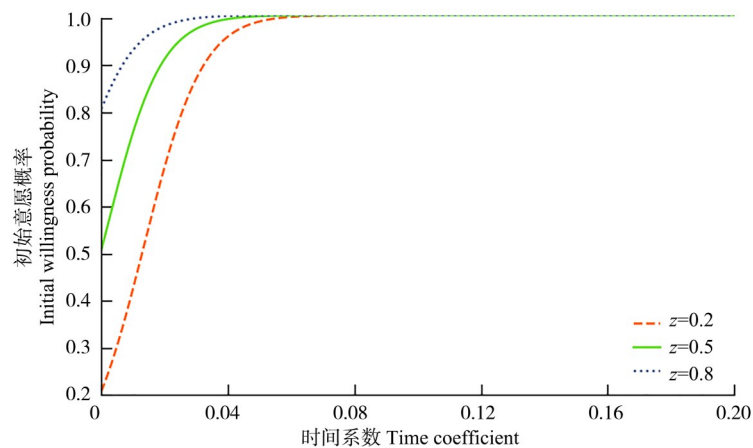


y 表示光伏企业积极参与初始意愿的概率。

y represents the initial willingness probability probability of active participation by photovoltaic enterprises.

图4 不同光伏企业初始意愿对系统演化影响

Fig. 4 Impact of different PV enterprises' initial willingness on system evolution



z 表示农村居民安装的初始意愿概率。

z represents the initial willingness probability probability of installation by rural residents.

图5 不同农村居民初始意愿对系统演化影响

Fig. 5 Impact of different rural residents' initial willingness on system evolution

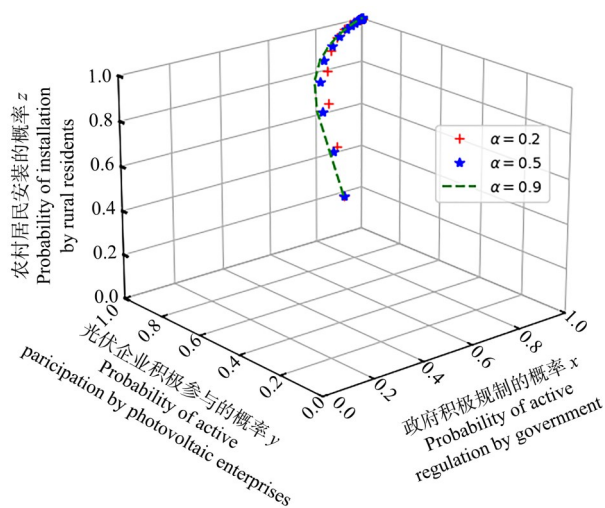
布式光伏技术发展的动态约束,在缺乏绿色能源知识储备与项目风险认知情况下,农村居民对屋顶光伏收益模式、设备安全性存在系统性误判,导致“高潜力、低采纳”市场悖论。这需加强对农村居民教育、提升技术透明度、提供保障措施,增强用户信心,通过熟人社会网络降低心理采纳成本,推动分布式光伏产业从政策驱动向需求拉动方向发展。

4.2 其他数值模拟

通过对各决策主体初始意愿深入剖析可知,主体间初始意愿异质性显著影响系统向稳态收敛速率。在现实场景中,实现系统协同演化理想路径在于充分激发各主体的主观能动性。本研究重点关注关键变量,探究其对分布式光伏系统协同发展影响效果,结果如图6~10。

4.2.1 光伏企业不同光伏技术创新投入强度 α 对系统演化的影响

光伏产业作为绿色能源发展核心力量,其技术创新能力直接决定应用场景潜力。光伏企业积极参与会开展光伏技术创新活动,使用先进的光伏产品;消极参与不会开展光伏技术创新活动,使用现有光伏产品。由图6可知,当光伏企业光伏技术创新投入强度分别为0.2、0.5、0.9时,对系统演化结



α 表示光伏企业光伏技术创新投入强度。

α represents the intensity of photovoltaic technology innovation investment by photovoltaic enterprises.

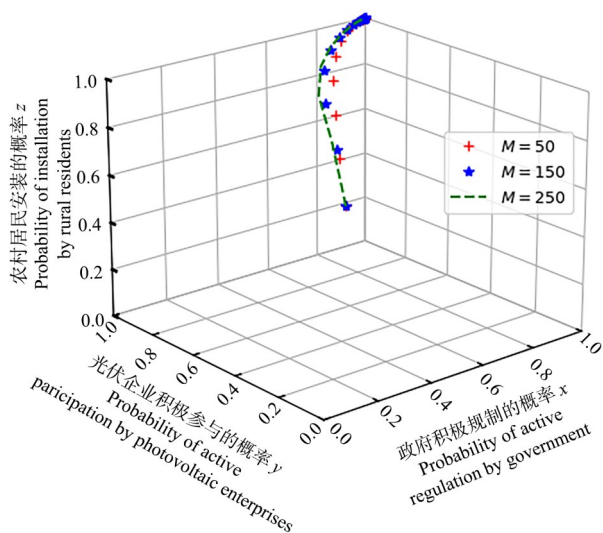
图6 光伏企业光伏技术创新投入强度对系统演化路径的影响

Fig. 6 Impact of the intensity of photovoltaic technology innovation investment by photovoltaic enterprises on the evolution path of the system

果无直接影响,仅改变系统达到稳定状态速率。光伏企业光伏技术创新投入强度越大,系统演化至稳定点速度加快。具体来看,当 $\alpha=0.2$ 时,光伏企业光伏技术创新动力不足,系统达到稳定状态路径较为平缓。随着 α 值增加,系统向稳定状态演化速率提升。高光伏技术创新投入强化了光伏企业策略优势,加速了三方主体协同演化。尤其在 $\alpha=0.9$ 时,演化稳定时间更短,凸显光伏企业光伏技术创新投入对系统效率的优化作用。从不同 α 值结果看,光伏企业光伏技术创新投入强度 α 是系统演化的关键驱动力,光伏技术创新投入强度越高,越有可能推动系统向更稳定状态演进。因此,光伏企业在生产中加大光伏技术创新投入,不仅能加速系统协同进程,还可促进三方策略更高水平协同。

4.2.2 政府的惩罚力度 M 对系统演化的影响

政府惩罚力度作为重要的外部约束手段,不仅能够规范光伏企业经营行为、维护市场公平竞争环境,更是推动产业向高质量、可持续方向发展的关键保障。根据图7可知,当政府对光伏企业罚款额



M 表示光伏企业消极参与时,政府给予光伏企业的罚款。

M represents the penalty imposed by the government on photovoltaic enterprises when they participate passively.

图7 政府的惩罚力度对系统演化路径的影响

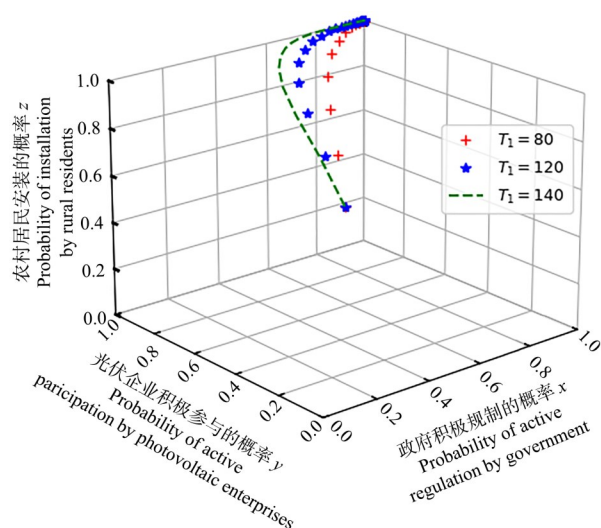
Fig. 7 Impact of the governments' penalty intensity on system evolution path

度 M 分别为50、150、250时,系统演化均能收敛于稳定状态,且惩罚力度增强显著加快了收敛进程。在较低惩罚强度下,光伏企业策略调整相对滞后,演化轨迹呈现平缓特征;随着惩罚力度逐步提升,光

伏企业为规避监管风险,加速进行光伏技术创新,系统收敛效率明显提高;当惩罚机制达到较高强度时,刚性约束迫使光伏企业主动突破技术瓶颈,通过光伏技术降低环境风险,促使演化进程加快。进一步分析表明,制度约束不仅倒逼光伏企业升级分布式光伏技术与安装流程规范,更驱动政府优化监管工具、农村居民增强参与与监督意识,形成多方策略动态适配,激发分布式光伏产业发展内生动力。

4.2.3 政府的 T_1 对系统演化的影响

政府税收优惠力度作为引导市场资源配置的关键杠杆,通过降低光伏企业光伏技术创新成本、释放盈利空间,能够显著激发光伏技术投入积极性与规模化发展动力,促进积极参与分布式光伏安装。由图8可知,当政府对光伏企业税收优惠力度 T_1 设定为80、120、140时,系统演化均能收敛于稳定状态,且税收激励强度提升显著加速了演化进程。在较低税收优惠情景下,光伏企业光伏技术创新时相对保守,演化轨迹呈现渐进式特征;随着税收优惠力度逐步增强,政策红利激发光伏企业加大研发投入,促使系统策略互动频率提升,收敛效率显著优化;当税收优惠达到较高水平时,制度激励形成强导向作用,光伏企业在政策利好条件下通过技术升级主动去适配政策目标,驱动演化轨迹斜率陡增,系统更快进入稳定状态。在分布式光伏产业发展中,税收优惠政策让渡的经济效



T_1 表示光伏企业积极参与时收到的税收优惠。
 T_1 represents the tax incentives received by photovoltaic enterprises when they actively participate.

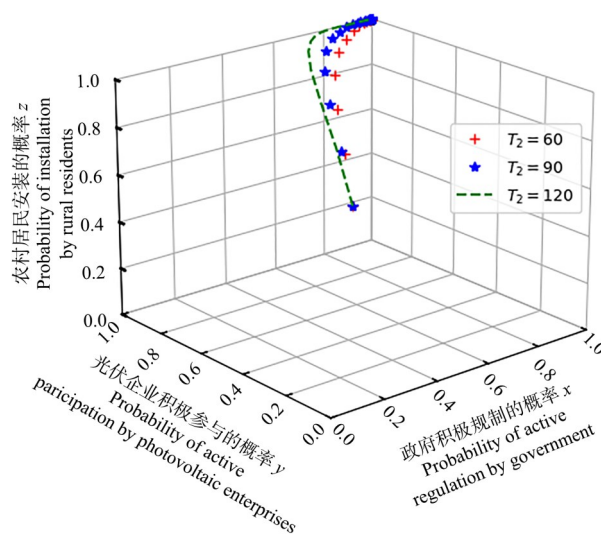
图8 政府的税收优惠力度对系统演化路径的影响

Fig. 8 Impact of the governments' tax incentives on the system evolution path

益不仅降低光伏企业光伏技术创新成本,更联动政府优化配套电网设施、农村居民提升参与意愿,形成多方协同的策略共振。

4.2.4 政府的绿色积分奖励力度 T_2 对系统演化路径的影响

政府对农村居民绿色积分奖励力度作为激活基层主体参与的核心政策工具,能够通过微观主体行为协同演化推动农村分布式光伏产业向好发展。由图9分析可知,当政府通过绿色积分奖励机制激励农村居民安装分布式光伏时,即 T_2 取值为60、90、120时,系统演化均能收敛于稳定状态,且积分奖励力度增强显著加速了均衡进程。在积分奖励为60时,农村居民安装分布式光伏发动力有限,系统演化呈现平缓波动特征。奖励达到较高强度时,积分兑换带来经济与社会价值提升了农村居民安装动力,加速了向(1,1,1)收敛进程,凸显出积分奖励力度对系统收敛的促进作用。



T_2 表示农村居民安装分布式光伏时收到政府给予的绿色积分奖励。
 T_2 represents the green credit rewards provided by the government to rural residents when they install distributed photovoltaic systems.

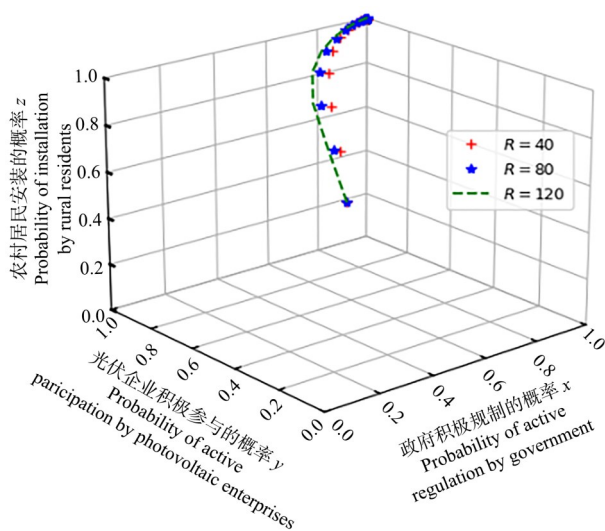
图9 政府的绿色积分奖励力度对系统演化路径的影响

Fig. 9 Impact of local governments' green credit incentives on the system evolution path

4.2.5 光伏企业的声誉收益 R 对系统演化路径的影响

光伏企业声誉收益作为隐性竞争资本,影响着企业光伏技术投入决策与长期发展战略和参与分布式光伏安装意愿。由图10可知,声誉收益参数 R 在40、80和120时对系统演化动态影响表现出显著差异。当 R 增大时,系统演化收敛速度显著提升。

当 R 从40提高至120时,三方博弈主体策略轨迹呈现出更陡峭上升趋势,且更快趋近于均衡点 $W_8(1,1,1)$ 。这表明声誉收益 R 通过增强光伏企业光伏技术创新边际效用,有效缩短了政府监管、企业积极投入与农村居民选择分布式光伏时间。表明声誉激励机制对三方协同稳定性正向调控作用。在推进分布式光伏产业发展时,应重视声誉资本积累,以加速帕累托最优均衡实现。



R 表示光伏企业积极参与且农村居民安装分布式光伏时,光伏企业获得的声誉。

R represents the reputation gained by photovoltaic enterprises when they actively participate and rural residents install distributed photovoltaic systems.

图10 光伏企业的声誉收益对系统演化路径的影响

Fig. 10 Impact of photovoltaic companies' reputation benefit on the system evolution path

5 结论与对策

5.1 研究结论

本研究立足农村分布式光伏发展场景,构建包含政府、光伏企业与农村居民三方博弈模型。通过对关键参数进行设定,深入探究三方主体策略选择以及系统稳定性影响因素,研究结论如下:1)税收优惠提升不仅降低光伏企业创新边际成本,还能激活政府配套电网投资与农村居民主动性,应在可控范围内加强税收优惠政策,实现短期激励与长期均衡的平衡目标。2)积分奖励政策对农村居民呈现“响应阈值效应”,设定合理兑换机制,可以提升其经济可见性与社会认可度,激活需求侧对绿色转型内生驱动力,这也为分布式光伏在农村市场规模化

应用提供重要思路。3)构建梯度化、信用挂钩惩罚机制不仅提升治理效率,也增强了制度规制信号传导功能,设计分阶段差异化惩罚区间,有利于强化“监管+激励”双重作用。4)光伏企业光伏技术创新投入强度提升是驱动分布式光伏产业发展向均衡状态演进的核心动力。鼓励光伏企业持续加大技术研发投入,可强化光伏企业积极参与安装分布式光伏策略优势、提高适配能力,从而成为分布式光伏在农村推广的核心推动力。5)农村居民初始认知临界阈值是系统演化早期阶段的关键限制因素。若政府和光伏企业未能通过补贴、宣传教育和风险保障机制及时调节农村居民意愿,极易出现“高潜力低采纳”悖论。6)声誉激励机制通过强化光伏企业光伏技术创新动力,显著加速多方利益主体协同演化。强化服务承诺、提升产品质量、优化安装体验,提升政府对其的政策倾斜及农村居民信任预期。

5.2 研究对策

为了更好地推进农村分布式光伏发展,提出以下对策:

1)政府应构建全生命周期监管体系和罚款与信用体系联动惩罚机制,强化对光伏企业事前资质审查、事中质量抽检与事后追溯机制,督促提供优质服务。引入市场化竞争机制,重点考量光伏企业光伏技术先进性、服务保障能力,对优质企业实施适度政策激励,实现分布式光伏产业从“政策输血”到“市场造血”的可持续转型。政府搭建数字化信息服务平台,精准匹配供需资源,通过可视化案例传播增强公众认知,了解农村居民实际需求,切实解决分布式光伏在农村地区发展中遇到的难题。政府动态调整农村居民补贴力度,在连片村落推行“光伏合作社”机制,农村居民以屋顶资源入股,企业负责投资运维,形成利益共享共同体。

2)光伏企业是分布式光伏直接提供者,需要创新分布式光伏技术,实现市场地位提升。光伏企业要注重分布式光伏产品质量监管,安装合格设备并定期对光伏板进行后期检查和维修,自觉提供高质量服务。通过深耕用户需求导向市场,塑造良好的企业形象,提升声誉。针对农村市场推出“光伏+农业”一体化方案,实现光伏板下种植喜阴作物(如中药材、菌菇),提升单位面积带给农村居民的收益。推行轻量化与柔性结合组件,减少农村房屋屋

顶承重限制,使其广泛适配于农村地区简易屋顶结构,实现市场份额扩大。

3)农村居民环保意识和对低碳生活的认知会影响政府政策制定以及光伏企业生产决策。农村居民可以关注地方光伏激励政策,主动对接乡村振兴部门,利用“光伏贷”等低息贷款降低初始投资成本。农村居民应树立绿色低碳的生活理念,积极主动安装分布式光伏,通过主动反馈遇到的疑难问题,为分布式光伏更好地发展提供有价值的建议。当面对个人负担成本过高情况,农村居民可以借助村民合作社统一招标,将传统“单户安装”升级为“社区化光伏生态”,实现风险共担与资金杠杆,推动农村清洁能源转型与集体经济增值双赢。

参考文献 References

- [1] 厉松芮,朱春旭 张立辉. 农村清洁能源多能互补系统多主体协同运行优化模型[J/OL]. 系统工程理论与实践, [2025-03-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20250306.1408.002.html>
- [2] Li S R, Zhu C X, Zhang L H. An optimization model for the multi-subject collaborative operation of rural clean energy multi-energy complementary system[J/OL]. *Systems Engineering Theory & Practice*, [2025-03-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20250306.1408.002.html> (in Chinese)
- [3] 李洪,吕鹏啸,李强. 太阳能光伏光热集热器性能研究及改进措施综述[J]. 建筑科学, 2025, 41(2): 16-24
- [4] Li H, Lv P X, Li Q, Hu Z Q. A review of performance studies and improvement measurements concerning solar photovoltaic and thermal collectors[J]. *Building Sciences*, 2025, 41(2): 16-24 (in Chinese)
- [5] 李钟实. 农村小型太阳能光伏电站施工与维护[M]. 北京:机械工业出版社, 2022
- [6] Li Z S. *Construction and Maintenance of Small Solar Photovoltaic Power Stations in Rural Areas*[M]. Beijing: China Machine Press, 2022 (in Chinese)
- [7] Simpson G, Clifton J. Testing diffusion of innovations theory with data: Financial incentives, early adopters, and distributed solar energy in Australia[J]. *Energy Research & Social Science*, 2017, 29: 12-22
- [8] 李纪珍,刘子譔. 光伏企业何以在补贴退坡中实现“逆势研发”[J]. 中国软科学, 2023(10): 34-43
- [9] Li J Z, Liu Z X. How do photovoltaic enterprises improve R&D investments in the trend of “phasing-out subsidies”[J]. *China Soft Science Magazine*, 2023(10): 34-43 (in Chinese)
- [10] 廖茂林,付华. 碳中和目标下清洁能源消纳议题:影响机理、国际经验与发展路径[J]. 东岳论丛, 2025, 46(1): 59-71
- [11] Liao M L, Fu H. The issue of clean energy accommodation under the carbon neutrality goal: Impact mechanisms, international experiences, and development pathways[J]. *Dongyue Tribune*, 2025, 46(1): 59-71 (in Chinese)
- [12] 邵晨旭,汤奕. 计及电压越限风险的含分布式光伏配电网三相负荷不平衡多目标优化方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 53-64
- [13] Shao C X, Tang Y. Imbalance multi-objective optimization method of three-phase load for distributed photovoltaic power distribution network considering risk of voltage overrun[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2023, 44(12): 53-64 (in Chinese)
- [14] 袁天梦,杨一宁,胡泽春. 考虑分布式光伏和储能接入的中低压配电网多时间尺度优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 101-112
- [15] Yuan T M, Yang Y M, Hu Z C. Multi-time scale optimal dispatch strategy for medium-voltage and low-voltage distribution networks with distributed PV and BESS access[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(1): 101-112 (in Chinese)
- [16] 尹国龙. 基于分布式光伏发电量预测分析的运行优化策略研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 118-124
- [17] Yin G L. Research on operation optimization strategy based on predictive analysis of distributed photovoltaic generation [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2021, 58(10): 118-124 (in Chinese)
- [18] 柳碧波,张静静,徐向阳. 中国城市分布式光伏发电经济性分析与区域利用研究[J]. 经济地理, 2019, 39(10): 54-61
- [19] Liu J B, Zhang J J, Xu X Y. Economy and regional utilization of urban distributed photovoltaic power generation in China[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(10): 54-61 (in Chinese)
- [20] 许建峰. 中国分布式光伏并网发电现状及应用研究[J]. 能源与节能, 2020(6): 45-48
- [21] Xu J F. Research on the status and application of distributed photovoltaic grid-connected power generation in China[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2020(6): 45-48 (in Chinese)
- [22] 刘军会,龚健,佟炳坤. 基于分布式储能与光伏的虚拟电厂与配电网协同优化方法[J/OL]. 中国电力, 1-9[2025-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20250226.0812.004.html>
- [23] Liu J H, Gong J, Tong B K. Coordinated optimization method for virtual power plants considering distributed energy storage and photovoltaics with distribution networks[J/OL]. *Electric Power*, 1-9[2025-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20250226.0812.004.html> (in Chinese)
- [24] 廖卫东,刘森. 自治、博弈与激励:我国农村人居环境污染治理的制度安排[J]. 生态经济, 2020, 36(5): 194-199
- [25] Liao W D, Liu M. Autonomy, games and incentives: the institutional arrangement of pollution governance of rural residential environment in China [J]. *Ecological Economy*, 2020, 36(5): 194-199 (in Chinese)
- [26] Li Y, Su X, Li Y. Evolutionary game analysis of microgrids' grid connection under government reward and punishment mechanism[J]. *Energy*, 2025, 318, 134676. DOI: 10.1016/j.energy.2025.134676
- [27] Zhang Z, Shi K, Gao Y. How does environmental regulation promote green technology innovation in enterprises[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2025, 68(5): 979-1008
- [28] Qian J, Zhou Y. Environmental regulation and green technology innovation [J]. *Computational Economics*, 2025, 25: 1-31
- [29] Bu Z, Liu J, Zhang X. Collaborative government-public efforts in driving green technology innovation for environmental governance in PPP projects: A study based on prospect theory[J]. *Kybernetes*, 2025, 54(3): 1684-1715
- [30] 罗福周,李静. 农村生态环境多主体协同治理的演化博弈研究[J]. 生态经济, 2019, 35(10): 171-176, 199

- Luo F Z, Li J. Research on evolutionary game of multi-agent cooperative governance of rural ecological environment[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(10): 171-176, 199 (in Chinese)
- [19] Qi D, Li X, Zhang G. An evolutionary game model for enterprise green transformation with stakeholder win strategies[J]. *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, 2025, 55(3): 654-669
- [20] 邹国良, 刘娜, 梁雁茹. 乡村振兴战略下农村人居环境整治PPP模式合作行为演化博弈分析[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(4): 61-68
- Zou G L, Liu N N, Liang Y R. Game analysis of cooperative behavior evolution of the PPP model of rural human settlement improvement under the rural revitalization strategy[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(4): 61-68 (in Chinese)
- [21] 徐伟, 刘振领, 王华智, 刘苏苏. 基于LCOE模型的农村光伏系统社会经济效益评价: 以北京郊区屋顶分布式光伏项目为例[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(9): 208-217
- Xu W, Liu Z L, Wang H Z, Liu S S. Social and economic benefit evaluation of rural photovoltaic systems based on LCOE model: A case study of roof distributed photovoltaic projects in Beijing suburbs[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 208-217 (in Chinese)
- [22] 王建军, 王然, 李莉. 动态博弈下居民智慧用电参与行为扩散的影响机制研究[J/OL]. *软科学*, 1-22[2025-06-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20250623.1311.004.html>
- Wang J J, Wang R, Li L. Research on the influencing mechanism of residents' smart electricity consumption participation behavior diffusion in dynamic games[J/OL]. *Soft Science*, 1-22[2025-06-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20250623.1311.004.html> (in Chinese)
- [23] 张申琪, 郭思培. 基于绿色发展的动态激励机制设计研究[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2025, 59(1): 83-95
- Zhang S Q, Guo S P. Research on the design of dynamic incentive mechanism based on green development[J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences Edition*, 2025, 59(1): 83-95 (in Chinese)
- [24] 戴道明, 赵莺. 考虑消纳责任权重的可再生能源电力供应链绿证监管演化博弈分析[J]. *中国电力*, 2025, 58(4): 216-229
- Dai D M, Zhao Y. Evolutionary game analysis of green certificate regulation in the renewable energy electricity supply chain considering the weight of absorption responsibility[J]. *China Electric Power*, 2025, 58(4): 216-229 (in Chinese)
- [25] 周文文, 凌丽丽, 焦昇, 曹凯雯, 曹惜萌. “双碳”目标下媒体报道与能源企业绿色创新行为的演化博弈分析[J]. *煤炭经济研究*, 2025, 45(4): 86-96
- Zhou W W, Ling L L, Jiao X, Cao K W, Cao X M. “Evolutionary game analysis of media reporting and energy enterprises' green innovation behaviors under the “dual carbon” goals[J]. *Coal Economic Research*, 2025, 45(4): 86-96 (in Chinese)

责任编辑: 王岩



第一作者简介: 尹士, 博士, 教授, 博士生导师, 太行学者, 河北省科技特派员, 河北农业大学人文社会科学学院副院长, 兼任多个SCI、SSCI以及中文期刊主编和副主编, 主要从事农村发展研究。目前主持国家及省部级项目8项。在*Nature*人文社科子刊、*中国管理科学*、*管理评论*等期刊发表CSSCI/SSCI/SCI等论文220余篇, 被引4 000余次, 其中ESI高被引热点论文10篇, Google-H指数34。在《保定日报》(理论版)发表乡村振兴与农村能源绿色低碳转型相关文章; 撰写商贸流通体系相关建议被民盟河北省委吸纳入政策建议, 该建议被国务院负责同志重要批示。