基于多主体演化博弈的碳普惠政策设计研究

苏晓影[1,2,3]，查冬兰[1,2,3,*]，王 梅[1,2,3]

1. 南京航空航天大学 经济与管理学院，南京 211106；
2. 南京航空航天大学 能源软科学研究中心，南京 211106；
3. 南京航空航天大学 “制造系统数智管理与低碳运营”江苏省高校哲学社会科学实验室，南京 211106

扫码阅读

摘 要： 作为实现消费端碳减排的关键工具，碳普惠政策的有效实施往往受制于多维利益主体的动态平衡。本文构建包含地方政府导向、平台运营策略、企业激励意愿及公众参与行为的四方演化博弈矩阵，旨在剖析各利益相关者的策略互动逻辑。研究表明，政府财政补贴并非维持系统稳定的必要条件，而刚性的惩罚约束有助于推动碳普惠平台采用“游戏化建设”策略。对于合约企业而言，其策略演化严格受制于绿色声誉所带来的边际收益水平。此外，尽管碳普惠平台提供的激励能够有效提升公众的参与意愿，但这一正向效应受到平台运营成本上限和公众个体行为成本的双重制约。上述结论揭示了碳普惠体系内生动力的传导机制，为优化政策顶层设计提供了理论依据。

关 键 词： 碳普惠政策；政府补贴；游戏化建设；消费端碳减排；四方演化博弈

中图分类号： F124.5；X321.2 **文献标志码：** A **文章编号：** 2097-4981(2026)01-0114-20

DOI：10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2025-0050

0 引言

在碳达峰碳中和目标要求下，居民消费侧的碳排放治理已成为中国碳治理体系的关键一环。据统计，2021年中国居民碳排放总量攀升至29.7亿吨，不仅占全国碳排放总量的50%以上，更较2002年激增2.27倍[1]。受制于高分散性、治理复杂性及显著的行为驱动特征[2]，消费侧减排目标的实现面临严峻的结构性挑战。在此背景下，碳普惠政策应运而生。该政策通过量化公众低碳行为价值，构建“行为−积分−权益”闭环激励体系，以挖掘居民端的减排潜力[3]，被视为生产端减排的重要补充[4]。目前，碳普惠政策已在中国部分地区开展了探索性实践。例如，广州碳普惠平台通过积分兑换功能引导居民开展低碳生活；蚂蚁森林依托数字技术实现线上激励、线下减排的有机融合[5]。2023年12月27日，《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》首次将碳普惠纳入国家顶层设计，明确提出构建绿色低碳产品标准、认证、标识体系，探索建立“碳普惠”等公众参与机制[6]。该文件的出台，标志着碳普惠政策正由地方试点迈向制度化与全国化推广的新阶段。

在碳普惠政策框架内，地方政府、碳普惠平台、合约企业及公众共同构成参与主体，如图1所示。公众通过践行低碳行为（如骑行共享单车、回收旧衣物等）获取可核证减排量，减排量经由碳普惠平台被量化并转化为“碳币”。公众可使用“碳币”兑换合约企业提供的商品或服务，如咖啡券、视频会员等，从而实现行为激励与消费回馈的闭环。为保障

收稿日期： 2025-09-10；**接受日期：** 2026-01-13

基金项目： 国家社会科学基金重大项目（23ZDA111）；国家自然科学基金面上项目（72373065）

作者介绍： 苏晓影（1996—），女，博士研究生，主要研究方向为能源系统建模、能源经济与环境政策。E-mail: suxiaoying@nuaa.edu.cn

通讯作者： 查冬兰（1983—），女，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为能源经济与环境政策、能源系统建模、能源效率与能源消费行为。E-mail: zdl@nuaa.edu.cn

引用格式： 苏晓影, 查冬兰, 王梅. 基于多主体演化博弈的碳普惠政策设计研究[J]. 能源与气候变化, 2026, 2(1): 114−133.

SU X Y, ZHA D L, WANG M. Research on the Design of Carbon Generalized System of Preference Based on Multi-Agent Evolutionary Game[J]. Journal of Energy and Climate Change, 2026, 2(1): 114−133.

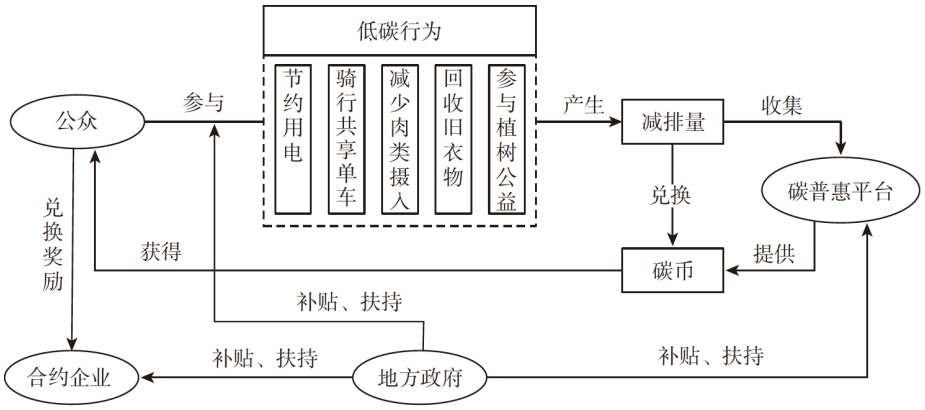


图 1　碳普惠政策运行机制

Fig.1　Operation mechanism of carbon generalized system of preference

碳普惠政策的长期存续与演化，财政补贴与政策扶持被地方政府作为提升各方参与意愿的关键工具[7]。受制于地区资源禀赋与经济发展水平的异质性，探索性试点已在部分地区先行展开。2020年，通过整合步行、骑行及公共交通等多元出行方式，北京市交通委员会联合高德地图、百度地图推出“MaaS”（Mobility as a Service）平台。该平台成为国内首个全民绿色出行碳普惠实践项目，截至2025年10月，其累计签发碳减排量已超46万吨。2022年，国内首个居民低碳用电碳普惠应用在深圳市生态环境局等多方推动下正式上线。尽管各地在激励形式、方法学设计及运行机制上呈现出显著差异，但公众参与度匮乏、企业激励效能边际递减及地方财政承压过重，依然是当前各地普遍面临的共性结构难题。

国际碳普惠类政策起步早于国内，并演化出多样化的实践范式。韩国于2009年推出的“碳钱包”（Carbon Cashbag）项目，通过将低碳消费行为转化为具有广泛流通性和实际购买力的碳积分，直接激励公众自愿参与减排。日本社会创新协会创立的“MyMizu”平台，展现了非政府组织在调配社会资源、抑制一次性塑料消费中的主导效能。荷兰“EcoCoin”项目则打通了跨领域的价值交换，将个人低碳行为转化为可交易货币，实现了激励价值的货币化流转。与国际高度市场化激励闭环与多元主体共治模式相比，中国碳普惠政策虽在覆盖广度与制度保障层面具有相对优势，但在市场化机制设计与多主体协同维度仍有一定不足。在现有政策中，“碳币”的使用场景局限于单一平台内部，缺乏“碳币”跨场景流通与变现的灵活定价机制。同时，运营模式多呈政府主导、企业被动参与的路径依赖特征，尚未形成商业可持续的多元协同生态。因此，系统研究碳普惠政策的运行机制及激励逻辑，对于推动该项政策的可持续发展具有重要的现实意义。

目前，关于碳普惠政策的学术研究成果主要沿“宏观绩效测度”与“微观行为归因”两条脉络展开。在宏观政策效果维度，无论是基于区域层面的实证检验[3]，还是聚焦于城市维度的效应分析[5]，均证实了碳普惠政策在抑制碳排放方面的显著正向效应。对于居民对碳普惠政策的参与意愿，相关研究指出，碳普惠机制通过重塑居民生活方式有效实现了消费端减排[2]。基于技术接受模型等理论，研究进一步将公众参与动因解构为态度倾向、环境感知、效用预期及激励手段等[8]。然而，既有文献虽在绩效测度与行为归因层面取得了相应的研究成果，但在剖析政策内部的运作机理及系统演化规律方面仍存在一定不足。特别是，已有研究尚未将政策顶层设计、平台运营策略、企业响应机制与公众参与行为纳入同一系统性分析框架，这在一定程度上制约了政策设计的科学性与长效性。

碳普惠政策的运行逻辑构建了一个由地方政府、碳普惠平台、合约企业及公众嵌套而成的复杂系统。在该系统中，地方政府作为政策制定者与激励者，依托补贴或税收优惠推动低碳治理进程[9]；碳普惠平台作为核心枢纽，承担从减排量化到权益兑换的全流程职能[10]；合约企业与公众则分别构成物质激励的供给侧与低碳行为的执行侧。由于该多主体互动

网络具有显著的非线性特征与策略依赖性，传统的静态均衡分析难以捕捉其动态演化规律，而基于有限理性假设的演化博弈理论能够提供最适配的解释工具[11]。该方法不仅能精准刻画信息不完全条件下各利益相关者的策略调整路径[12]，更能深层解构绿色低碳平台中错综复杂的多主体互动机理[13-15]。考虑到政府补贴、平台机制、企业投入与公众参与间的利益耦合与策略互动极为紧密，而双边或三方博弈模型的解释力相对有限，本文通过构建四方演化博弈框架分析此类多主体策略演化过程。

本文聚焦于地方政府、碳普惠平台、合约企业及公众4个关键利益主体，构建了四方复制动态演化博弈模型，其核心意图在于回答以下4个关键问题：1）政府应如何通过优化补贴机制设计以有效提高其余三方的参与意愿；2）在降低公众低碳行为成本的同时，何种平台奖励机制能最大化提升公众的参与积极性；3）除常规补贴外，刚性的惩罚机制是否构成平台采取“游戏化建设”策略的必要条件；4）量化后的企业绿色商誉价值能否成为驱动其参与政策的决定性因素。相较于已有研究，本文的边际贡献主要有3个方面：1）搭建了碳普惠政策多主体协同的系统性分析框架，厘清了四方主体之间复杂的利益耦合关系；2）基于动态演化视角，揭示了碳普惠政策演进的内在规律，通过模拟多主体策略调整路径，识别出了政策摆脱单一财政依赖、实现内生可持续发展的关键条件；3）引入平台游戏化设计，将其与企业绿色商誉等关键内生变量创新性地纳入博弈模型矩阵，为量化解析碳普惠激励机制提供了新的参数依据。

1 问题描述和模型构建

1.1 问题描述与博弈模型逻辑提出

随着碳普惠政策在各省市的接续落地，其在推广与运行过程中面临的阻碍日益显现。尽管财政补贴在初期阶段能够有效提高公众参与意愿，但也加剧了地方财政压力，更诱发了各参与主体对补贴的路径依赖[16]，进而导致激励扭曲与效率损失[17]。一方面，居民碳减排量呈现出显著的碎片化与低贡献特征[18-19]。截至2024年6月，广东省碳普惠核证减排量的备案规模（约247万吨）不足同期碳配额成交量（超2.2亿吨）的2%；另一方面，受制于流量变现与品牌转化机制的低效，合约企业虽享有潜在的绿色商誉与用户流量，但其实际参与动力不足。截至2023年7月中旬，广州碳普惠平台累计注册用户为22.63万人，累计发放碳币超过3 500万枚，而实际兑换量仅约为400万枚。此外，作为联结政府、企业与公众的关键枢纽，碳普惠平台的运营尚未摆脱对政府补贴的重度依赖，市场化盈利模式仍处于摸索阶段[20]。2021年9月4日，高德地图与北京市政路桥建材集团有限公司就“MaaS出行绿动全城”碳普惠活动产生的1.5万吨碳减排量达成交易意向，但距离真正成熟的市场化机制仍存在显著差距。

面对财政紧缩与减排刚性的双重挤压，如何降低补贴依赖并实现多方共容的内生动力机制成为碳普惠政策可持续演进的核心命题。既有研究提供了两条思路：在微观层面，部分研究依托涵盖成就体系与竞争排名的“游戏化建设”来重塑用户行为心理，该方法被视为增强用户黏性与留存意愿的有效手段[21-22]；在宏观层面，部分研究打通了碳普惠市场与中国碳排放权交易（China Carbon Emission Trading，CCET）市场的互联互通渠道[10]，不仅能实现减排资产的市场化消纳，更能构建“激励投放–行为产出–收益再投资”的正向闭环。同时，部分研究发现，将合约企业的激励投入转化为绿色商誉同样能够提高企业参与意愿[23-24]。

基于此，本文构建了一个涵盖地方政府、碳普惠平台、合约企业及公众的四方演化博弈框架。该模型遵循有限理性假设，将各方视为追求自身效用最大化的适应性主体，依据博弈环境的反馈来动态调整决策，直至系统收敛于稳定均衡。在该博弈框架中，各主体的职能与策略逻辑如图2所示。

作为规则制定者，地方政府需要在财政韧性与激励有效性之间寻找平衡点，其策略核心在于构建“激励–约束”的动态调整机制：一方面通过差异化补贴提高各方的初始参与门槛；另一方面，利用适度的罚金机制形成刚性约束[15]，倒逼平台克服“非游戏化建设”的惰性，强制其向具备高用户黏性的“游戏化建设”策略转型。

碳普惠平台承担将零散减排量转化为可交易资

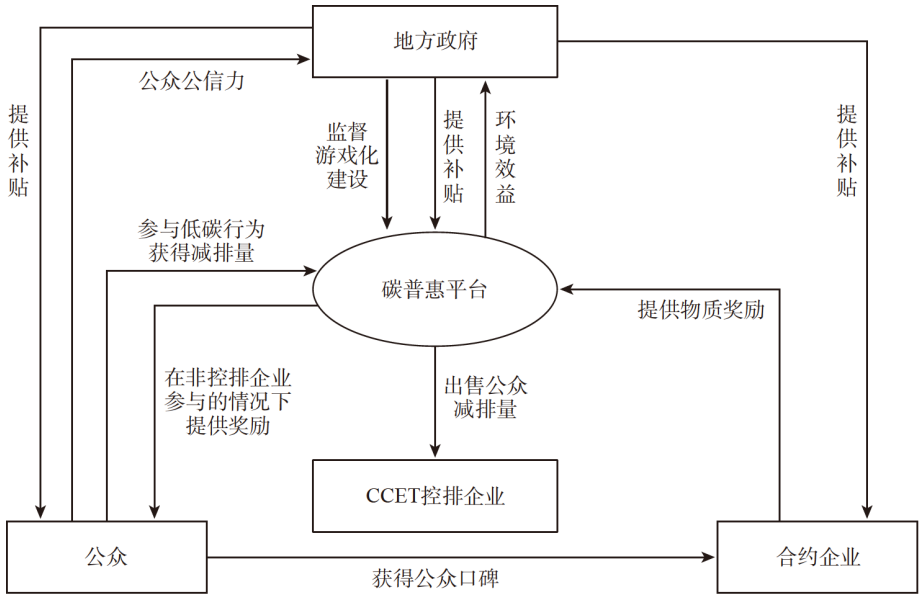


图 2 碳普惠政策博弈模型逻辑

Fig.2 Logical relations in game theory models of the carbon generalized system of preference

产（出售给控排企业）的职能，其策略博弈集中于“建设成本”与“流量收益”的边际权衡。虽然“游戏化建设”需承担高昂的技术与运营成本，如积分体系、界面设计等，但能通过提高居民参与意愿扩大减排量规模，进而提高平台收益；反之，“非游戏化建设”策略虽能压降当期支出，却面临用户活跃度低迷导致的长期收益缩水风险。

合约企业充当连接消费端与激励端的纽带，其核心决策在于是否通过提供优惠券、权益等资源来换取绿色商誉。当公众流量转化带来的市场份额提升与品牌形象溢价，足以覆盖其支出的运营成本与激励成本时，企业才会从观望转向实质性的“提供奖励”策略。

公众是减排行为的终端执行者。他们在追求低碳行为（如骑行共享单车、垃圾分类等）带来的心理满足与平台物质奖励的同时，对低碳行为的参与成本保持高度敏感。这些成本不仅包括购买绿色产品的显性经济成本，更涵盖了牺牲便利性（如调节空调温度）、投入时间精力（如学习垃圾分类规则）等隐性成本。只有当外部激励与内在心理收益的总和大于其感知的参与成本时，公众才能持续践行低碳行为。

总体而言，四方演化博弈模型能够系统揭示政府激励约束机制、平台运营策略、企业参与动机与公众行为决策之间的动态反馈关系。本文通过分析各主体在不同政策参数下的策略演化路径，以期为碳普惠政策的机制优化与可持续设计提供理论支撑。

1.2 模型构建

为构建碳普惠政策中各利益主体间的博弈模型，本文作出如下假设：

假设1：选择地方政府、碳普惠平台、合约企业及公众四方作为博弈主体。地方政府分别以x和$1-x$的概率选择“积极推进”和“消极推进”策略。碳普惠平台分别以y和$1-y$的概率选择“游戏化建设”策略和“非游戏化建设”策略。合约企业为提高声誉选择“提供奖励”的概率为z，而选择“不提供奖励”的概率为$1-z$；公众选择“参与”碳普惠政策的概率为w，而“不参与”该机制的概率为$1-w$。$w,x,y,z\in[0,1]$。四方博弈主体均为风险中性，且以追求自身利益最大化为目标。

假设2：当地方政府选择“积极推进”策略时，需付出额外的监管成本C_g。为提高其余三方参与碳普惠政策的意愿，地方政府分别向碳普惠平台、合约企业和公众给予相应的补贴。但其余三方获得政

府补贴存在前提：只有当碳普惠平台选择“游戏化建设”策略时，才能获得相应的补贴S_{gp}；当合约企业选择“提供奖励”策略时，才能获得相应的补贴S_{ge}；当公众选择“参与”策略时，才能获得相应的补贴S_{gi}。反之，若地方政府考虑成本，选择“消极推进”碳普惠政策时，将不会向其余参与者提供补贴。此时，由于地方政府未能响应国家积极推进碳普惠政策的号召，将面临社会公信力的损失，该损失被表示为G_g。公众的日常活动会产生碳排放，即环境损失E，由政府承担。而当公众选择“参与”碳普惠政策时，政府将获得额外的环境收益R。

假设3：碳普惠平台选择“游戏化建设”会投入更多的时间和精力，付出更高的建设成本C_{11}和运营平台成本C_{12}，而选择“非游戏化建设”时付出的建设成本和运营成本分别为C_{21}和C_{22}。由于碳普惠平台对接CCET市场，当公众参与平台时，平台会以CCET市场碳价P_1对收集到的公众碳减排量进行售卖。当碳普惠平台选择“游戏化建设”策略时，会提高公众低碳行为的参与率，此时公众的减排量变为$(1+\alpha)R$且$\alpha \in (0,1)$，碳普惠平台的收益也相应增加。由于“游戏化建设”是提高公众参与率的重要手段，当碳普惠平台选择“非游戏化建设”策略时，政府将对平台处以罚金约束O。

假设4：当合约企业选择“提供奖励”策略时，需要付出一定的建设成本C_3与碳普惠平台链接，并且需要向碳普惠平台提供一定的物质奖励S_{ep}。此时，提供奖励的合约企业较其余企业会额外获得声誉G_e。当合约企业选择“不提供奖励”策略时，并不需要支付建设成本。由于合约企业自愿参与碳普惠策略，此时不会受到惩罚或者声誉损失。当合约企业选择“不提供奖励”时，公众参与低碳行为的概率随之降低。此时，公众的减排量为$(1-n)R$且$n \in (0,1)$，碳普惠平台收益也相应降低。

假设5：当公众选择“参与”策略时，会付出时间、精力等参与成本C_4，并获得心理满足感D。当合约企业参与碳普惠政策时，公众会获得物质奖励，但该物质奖励需基于个人减排量R获得。具体而言，用户需要将减排量以一定的比例β兑换成碳普惠平台使用的“碳币”，并根据“碳币”的价值P_2获得最终的奖励，即公众将会获得βRP_2的物质奖励。

各变量含义如表1所示，四方博弈支付矩阵见附表1[①]。

2 博弈主体策略稳定性分析

2.1 政府部门策略稳定性分析

政府部门选择“积极推进”或“消极推进”的期望收益、复制动态方程和一阶导数分别为

$$
\begin{cases}
\begin{aligned}
U_x = {} & yzw\left[-S_{gp}-S_{ge}-S_{gi}+(1+\alpha)R-C_g-E\right]+y(1-z)w\left[-S_{gp}-S_{gi}+(1+\alpha)(1-n)R-C_g-E\right]+\\
& (1-y)zw\left(-S_{ge}-S_{gi}+R+O-C_g-E\right)+(1-y)(1-z)w\left[-S_{gi}+(1-n)R+O-C_g-E\right]+\\
& yz(1-w)\left(-S_{gp}-S_{ge}-C_g-E\right)+y(1-z)(1-w)\left(-S_{gp}-C_g-E\right)+\\
& (1-y)z(1-w)\left(-S_{ge}-C_g-E+O\right)+(1-y)(1-z)(1-w)\left(O-C_g-E\right)\\
U_{1-x} = {} & yzw\left[-G_g+(1+\alpha)R-E\right]+y(1-z)w\left[(1+\alpha)(1-n)R-G_g-E\right]+\\
& (1-y)zw\left(R+O-G_g-E\right)+(1-y)(1-z)w\left[(1-n)R+O-G_g-E\right]+\\
& yz(1-w)\left(-G_g-E\right)+y(1-z)(1-w)\left(-G_g-E\right)+\\
& (1-y)z(1-w)\left(-G_g-E+O\right)+(1-y)(1-z)(1-w)\left(O-E-G_g\right)\\
\overline{U_x} = {} & xU_{11}+(1-x)U_{12}=O-E-G_g-xC_g+xG_g-yO+wR-nwR-wxS_{gi}-\\
& xyS_{gp}-xzS_{ge}+\alpha wyR+nwaR-\alpha nwyR+\alpha nwyzR
\end{aligned}
\end{cases}
\tag{1}
$$

① 因篇幅所限，相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录 1。

表 1 变量定义

Table 1 Variable definitions

符号	描述	符号	描述
x	政府部门选择“积极推进”策略的概率	y	碳普惠政策选择“游戏化建设”策略的概率
z	合约企业选择“参与”策略的概率	w	公众选择“参与”策略的概率
α	因碳普惠平台采用“游戏化建设”而提高的公众对平台相关低碳行为的参与率	n	因合约企业不参与碳普惠政策而降低的公众对平台相关低碳行为的参与率
β	公众碳减排量兑换成“碳币”的比例	C_g	政府选择“积极推进”时付出的监管成本
C_{11}	碳普惠平台选择“游戏化建设”付出的平台建设成本	C_{12}	碳普惠平台选择“游戏化建设”付出的平台运营成本
C_{21}	碳普惠平台选择“非游戏化建设”付出的平台建设成本	C_{22}	碳普惠平台选择“非游戏化建设”付出的平台运营成本
C_3	合约企业参与碳普惠政策时付出的运营成本	C_4	公众参与碳普惠政策的低碳行为时付出的参与成本
E	公众选择不参与碳普惠政策时产生的碳排放量	R	公众参与碳普惠政策时获得的减排量
D	公众参与平台相关低碳行为时获得的心理满足感	C_e	合约企业向碳普惠平台提供奖励时获得的公众口碑
G_g	政府部门选择不补贴时损失的公信力	O	当碳普惠平台选择“非游戏化建设”时，政府部门收取的罚金
P_1	碳普惠平台出售公众碳减排量的碳价	P_2	碳普惠平台中“碳币”的价值
S_{gi}	政府部门向公众提供的补贴	S_{ge}	政府部门向合约企业提供的补贴
S_{gp}	政府部门向碳普惠平台提供的补贴	S_{ep}	合约企业通过碳普惠平台向公众提供的物质奖励

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = x\left(U_x - \overline{U_x}\right) \\ &= x(x-1)\left(C_g - G_g + wS_{gi} + yS_{gp} + zS_{ge}\right) \end{aligned} \tag{2}$$

$$F'(x) = (2x-1)\left(C_g - G_g + wS_{gi} + yS_{gp} + zS_{ge}\right) \tag{3}$$

由微分方程稳定性定理可知，政府部门选择补贴处于稳定状态必须满足：$F(x)=0$且$F'(x)<0$。

命题1：当$w>w_0$时，政府部门采用“消极推进”的稳定策略；当$w<w_0$时，政府部门采用“积极推进”的稳定策略；当$w=w_0$时，无法确定稳定策略。其中，阈值$w_0=\left(C_g-G_g+yS_{gp}+zS_{ge}\right)/S_{gi}$。

证明：令$N(w)=C_g-G_g+wS_{gi}+yS_{gp}+zS_{ge}$，因为$N'(w)=S_{gi}$，所以$N(w)$为单调递增函数。当$w>w_0$时，$N(w)>0$，$F(x)|_{x=0}=0$且$F'(x)|_{x=0}<0$，则$x=0$具有稳定性；当$w<w_0$时，$N(w)<0$，$F(x)|_{x=1}=0$且$F'(x)|_{x=1}<0$，则$x=1$具有稳定性；当$w=w_0$时，$N(w)=0$，$F(x)=0$且$F'(x)=0$，则$x\in[0,1]$均处于稳定状态，无法确定稳定策略。

命题1表明：政府部门在碳普惠政策中的策略选择本质为成本–收益动态权衡过程。当监管成本高于政府获得的政策收益时，阈值增加，使得策略区间向“消极推进”倾斜。当公众因政府消极作为产生信任危机时，阈值降低，社会舆论压力迫使政府采取“积极推进”策略。平台选择“游戏化建设”及企业选择“提供奖励”均会提高政府积极作为的概率。但当公众补贴规模扩大时，阈值提升，政府经济负担增加，进而倾向于选择“消极推进”策略。

根据命题1，地方政府策略选择的相位图如图3所示。

在图3中，V_{x_1}部分的体积代表政府选择“消极推进”策略的概率；对应地，V_{x_2}部分的体积代表政府选择“积极推进”策略的概率，经计算可得

$$\begin{aligned} V_{x_1} &= \int_0^1\int_0^1\left(\frac{C_g-G_g+yS_{gp}+zS_{ge}}{S_{gi}}\right)\mathrm{d}z\mathrm{d}y \\ &= \frac{2\left(C_g-G_g\right)+S_{ge}+S_{gp}}{2S_{gi}} \end{aligned} \tag{4}$$

$$V_{x_2} = 1 - V_{x_1} = \frac{2\left(S_{gi}-C_g+G_g\right)-S_{ge}-S_{gp}}{2S_{gi}} \tag{5}$$

推论1：在碳普惠政策中，政府选择“积极推进”策略的概率与$2\left(S_{gi}-C_g+G_g\right)-S_{ge}-S_{gp}$正相关，与$S_{gi}$负相关。

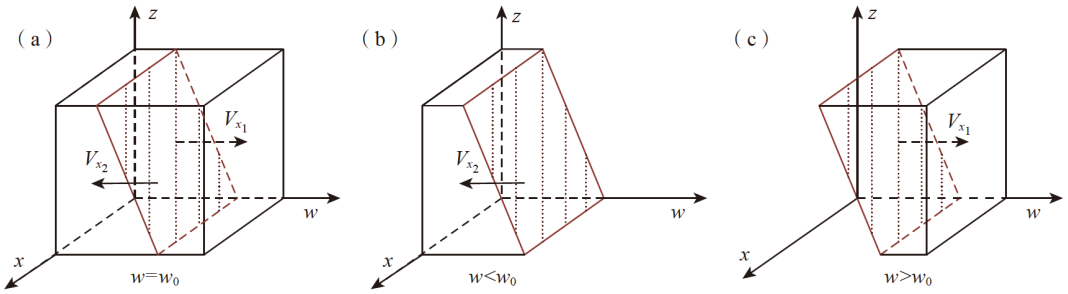


图 3 地方政府策略选择的相位图

Fig.3 Phase diagram of local government strategy selection

推论1表明：地方政府在碳普惠政策中的介入程度，并非取决于单一的行政意愿，而是严格受制于资源配置效率与多维成本风险的动态博弈均衡。尽管通过全方位的补贴能构筑起公众与企业的激励闭环，但“积极推进”策略的维持存在严格的“经济可行性边界”。模型推导表明，只有当公众端补贴所激发的边际社会效益足够显著，即覆盖包括企业补贴、平台补贴及政府监管成本在内的双倍投入规模时，政府的“积极推进”策略才具备经济正当性。然而，财政预算的刚性约束始终是制约政策强度的终极变量。随着向企业、平台及公众的三重补贴叠加，财政压力将呈非线性累积。一旦补贴总规模触及预算上限，导致投入成本突破政策收益的临界阈值，政府的理性选择将不可避免地由“积极推进”向“消极维持”发生策略退化。

2.2 碳普惠平台策略稳定性分析

碳普惠平台选择“游戏化建设”或“非游戏化建设”策略的期望收益、复制动态方程和一阶导数分别为

$$\begin{cases} U_y = xwz\left[S_{gp}+S_{ep}+(1+\alpha)R(P_1-\beta P_2)-C_{11}-C_{12}\right]+xw(1-z)\left[-C_{11}-C_{12}+S_{gp}+(1+\alpha)(1-n)RP_1\right]+ \\ \quad x(1-w)z\left(-C_{11}-C_{12}+S_{gp}+S_{ep}\right)+x(1-w)(1-z)\left(-C_{11}-C_{12}+S_{gp}\right)+ \\ \quad (1-x)wz\left[S_{ep}+(1+\alpha)R(P_1-\beta P_2)-C_{11}-C_{12}\right]+(1-x)w(1-z)[(1+\alpha)(1-n)RP_1-C_{11}-C_{12}]+ \\ \quad (1-x)z(1-w)\left(-C_{11}-C_{12}+S_{ep}\right)+(1-x)(1-z)(1-w)(-C_{11}-C_{12}) \\ U_{1-y} = xwz\left[S_{ep}+R(P_1-\beta P_2)-C_{21}-C_{22}-O\right]+xw(1-z)[(1-n)RP_1-C_{21}-C_{22}-O]+ \\ \quad x(1-w)z\left(-C_{21}-C_{22}-O+S_{ep}\right)+x(1-w)(1-z)(-C_{21}-C_{22}-O)+ \\ \quad (1-x)wz\left[S_{ep}+R(P_1-\beta P_2)-C_{21}-C_{22}-O\right]+(1-x)w(1-z)[(1-n)RP_1-C_{21}-C_{22}-O]+ \\ \quad (1-x)z(1-w)\left(-C_{21}-C_{22}-O+S_{ep}\right)+(1-x)(1-z)(1-w)(-C_{22}-C_{21}-O) \\ \overline{U_y} = yU_y+(1-y)U_{1-y} \\ \quad = yC_{21}-C_{22}-O-yC_{11}-yC_{12}-C_{21}+yC_{22}+yO+zS_{ep}+wRP_1+xyS_{pg}- \\ \quad nwRP_1+\alpha wyRP_1-\beta wzRP_2-\alpha nwyRP_1-\alpha\beta wyzRP_2+\alpha nwyzRP \end{cases} \tag{6}$$

$$F(y)=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=y(U_{21}-\overline{U_2}) \\ =-y(y-1)\left(C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O+xS_{gp}+\alpha wRP_1-\alpha nwRP_1-\alpha\beta wzRP_2+\alpha nwzRP_1\right) \tag{7}$$

$$F'(y)=(-2y+1)\left(C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O+xS_{gp}+\alpha wRP_1-\alpha nwRP_1-\alpha\beta wzRP_2+\alpha nwzRP_1\right) \tag{8}$$

由微分方程稳定性定理可知，碳普惠平台选择“游戏化建设”策略处于稳定状态必须满足：$F(y)=0$且$F'(y)<0$。

命题2：当$x<x_0$时，碳普惠平台的策略为“非游戏化建设”；当$x>x_0$时，碳普惠平台的策略为“游戏化建设”；当$x=x_0$时，无法确定稳定策略。其中，阈值$F'(y)=(C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O+\alpha wRP_1-\alpha nwRP_1-\alpha\beta wzRP_2+\alpha nwzRP_1)/S_{gp}$。

证明：令$H(x)=F'(y)=C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O+xS_{gp}+\alpha wRP_1-\alpha nwRP_1-\alpha\beta wzRP_2+\alpha nwzRP_1$，$H'(x)=S_{gp}>0$，因此，$H(x)$关于$x$是增函数。当$x<x_0$时，$H(x)<0$，$F(y)\big|_{y=0}=0$且$F'(y)\big|_{y=0}<0$，则$y=0$具有稳定性；当$x>x_0$时，$H(x)>0$，$F(y)\big|_{y=1}=0$且$F'(y)\big|_{y=1}<0$，则$y=1$具有稳定性；当$x=x_0$时，$H(x)=0$，$F(y)=0$且$F'(y)=0$，则$y\in[0,1]$均处于稳定状态，无法确定稳定策略。

命题2表明：碳普惠平台在博弈过程中表现出显著的阈值特征与成本收益动态响应逻辑。在政府政策推进动能不足的约束条件下，财政补贴无法有效填补平台运营的边际成本，理性的平台往往倾向于收敛至低投入的“非游戏化建设”策略，以规避财务风险。只有当政府大幅增加财政支持，使包括增强现实技术、高频交互设计及用户界面优化等在内的昂贵游戏化改造成本被补贴有效分摊时，实施门槛的显著降低才能使“游戏化建设”策略具备经济可行性。与之构成互补效应的是作为“硬约束”的政策惩罚机制。罚金设定构成平台决策函数中的关键负向变量，违规成本的严厉程度与平台合规意愿呈现严格的正相关性，即高额的潜在罚金将倒逼平台主动锁定“游戏化建设”策略路径，从而实现从被动适应到主动合规的策略跃迁。

根据命题2，碳普惠平台策略选择的相位图如图4所示。

在图4中，V_{y_1}部分的体积代表碳普惠平台选择“游戏化建设”策略的概率；对应地，V_{y_2}部分的体积代表碳普惠平台选择“非游戏化建设”策略的概率，经计算可得

$$V_{y_1}=\int_0^1\int_0^1\frac{C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O+\alpha wRP_1-\alpha nwRP_1-\alpha\beta wzRP_2+\alpha nwzRP_1}{S_{gp}}\mathrm{d}w\mathrm{d}z$$
$$=\frac{1}{S_{gp}}\left[(C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O)+\frac{\alpha(1-n)RP_1}{2}+\frac{\alpha R(nP_1-\beta P_2)}{4}\right] \quad (9)$$

$$V_{y_2}=1-V_{y_1}=\frac{S_{gp}-(C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O)+\frac{\alpha(1-n)RP_1}{2}+\frac{\alpha R\left(nP_1-\beta P_2\right)}{4}}{S_{gp}} \quad (10)$$

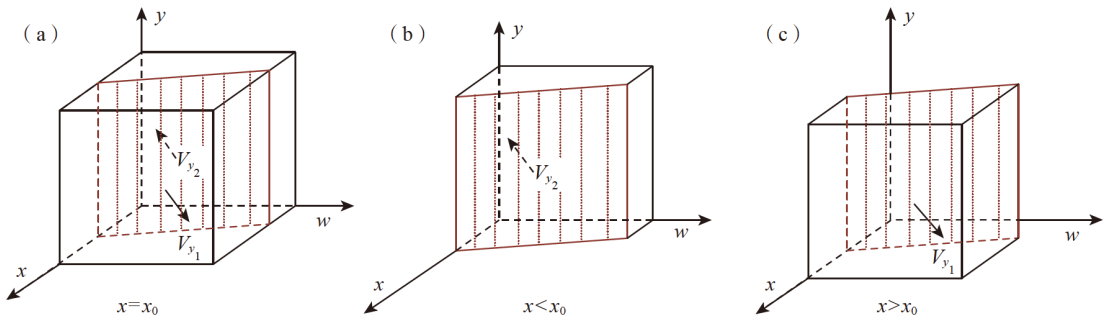


图4　碳普惠平台策略选择的相位图

Fig.4　Phase diagram of the carbon generalized system of preference platform strategy selection

推论2：在碳普惠政策中，碳普惠平台选择“游戏化建设”策略的概率与$(C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O)+\frac{\alpha(1-n)RP_1}{2}+\frac{\alpha R(nP_1-\beta P_2)}{4}$正相关，与$S_{gp}$负相关。

推论2表明：碳普惠平台是否选择“游戏化建设”策略，主要取决于成本比较与公众参与所带来的额外收益。当游戏化建设的成本较低、政府处罚力度较强时，碳普惠平台更倾向于采用“游戏化建设”策略。与此同时，“游戏化建设”策略能够提升公众参与低碳行为的积极性，即使在合作企业参与不足的情况下，公众的积极参与仍可带来额外的减排效果，为平台创造可观收益。相反，如果政府向平台提供较高的补贴，平台对通过公众参与获取额外收益的依赖性下降，将会降低自身选择“游戏化建设”策略的动力。

2.3 合约企业策略稳定性分析

合约企业选择“提供奖励”或“不提供奖励”策略的期望收益、复制动态方程和一阶导数分别为

$$\begin{cases} U_z = xyw\left(-C_3-S_{ep}+S_{ge}+G_e\right)+ \\ \quad xy(1-w)\left(-C_3-S_{ep}+S_{ge}\right)+ \\ \quad (1-x)yw\left(-C_3-S_{ep}+G_e\right)+ \\ \quad (1-x)y(1-w)\left(-C_3-S_{ep}\right)+ \\ \quad x(1-y)w\left(-C_3-S_{ep}+S_{ge}+G_e\right)+ \\ \quad x(1-y)(1-w)\left(-C_3-S_{ep}+S_{ge}\right)+ \\ \quad (1-x)(1-y)w\left(-C_3-S_{ep}+G_e\right)+ \\ \quad (1-x)(1-y)(1-w)\left(-C_3-S_{ep}\right) \\ U_{1-z}=0 \\ \overline{U_z}=zU_z+(1-z)U_{1-z} \\ \quad =-z\left(C_3+S_{ep}-wG_e-xS_{ge}\right) \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} F(z)=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}&=z(U_z-\overline{U_z}) \\ &=z(z-1)\left(C_3+S_{ep}-wG_e-xS_{ge}\right) \end{aligned} \tag{12}$$

$$F'(z)=(2z-1)\left(C_3+S_{ep}-wG_e-xS_{ge}\right) \tag{13}$$

由微分方程稳定性定理可知，合约企业选择“提供奖励”策略处于稳定状态必须满足：$F(z)=0$且$F'(z)<0$。

命题3：当$x<x_0$时，合约企业的策略为“不提供奖励”；当$x>x_0$时，合约企业的策略为“提供奖励”；当$x=x_0$时，无法确定稳定策略。其中，阈值$x_0=\left(wG_e-C_3-S_{ep}\right)/S_{ge}$。

证明：令$G(x)=C_3+S_{ep}-wG_e-xS_{ge}$，$G'(x)=-S_{ge}<0$，因此，$G(x)$为关于$x$的单调递减函数。当$x<x_0$时，$G(x)>0$，$F(z)|_{z=0}=0$且$F'(z)|_{z=0}<0$，则$z=0$具有稳定性；当$x>x_0$时，$G(x)<0$，$F(z)|_{z=1}=0$且$F'(z)|_{z=1}<0$，则$z=1$具有稳定性；当$x=x_0$时，$G(x)=0$，$F(z)=0$且$F'(z)=0$，则$z\in[0,1]$均处于稳定状态，无法确定稳定策略。

命题3表明：地方政府财政干预对合约企业的策略选择具有决定性的调节作用。作为缓解企业财务压力的关键外生变量，政府补贴通过直接摊薄初始投资与运营成本，有效降低了企业向公众让渡物质利益（如发放优惠券、折扣权益）时的经济门槛。这种财政“缓冲垫”效应使得企业能够在不恶化自身财务健康度的前提下，覆盖部分乃至全部的外部激励支出，从而为“提供奖励”策略赋予经济合理性。

根据命题3，合约企业策略选择的相位图如图5所示。

在图5中，V_{z_1}部分的体积代表合约企业选择“提供奖励”策略的概率；对应地，V_{z_2}体积代表合约企业选择“不提供奖励”策略的概率，经计算可得

$$\begin{aligned} V_{z_1}&=\int_0^1\int_0^1\frac{wG_e-C_3-S_{ep}}{S_{ge}}\mathrm{d}w\mathrm{d}z \\ &=-\frac{C_3-\frac{G_e}{2}+S_{ep}}{S_{ge}} \end{aligned} \tag{14}$$

$$V_{z_2}=1-V_{z_1}=1+\frac{C_3-\frac{G_e}{2}+S_{ep}}{S_{ge}} \tag{15}$$

推论3：在碳普惠政策中，合约企业是否提供奖励的概率与$C_3-G_e/2+S_{ep}$负相关，与S_{ge}正相关。

推论3表明：合约企业“提供奖励”的概率呈现出对运营成本及平台补贴支出的严格负相关性，以及对声誉回报与政府直接补贴的显著正相关性。这意味着，企业的最终决策本质上是多重变量的非线

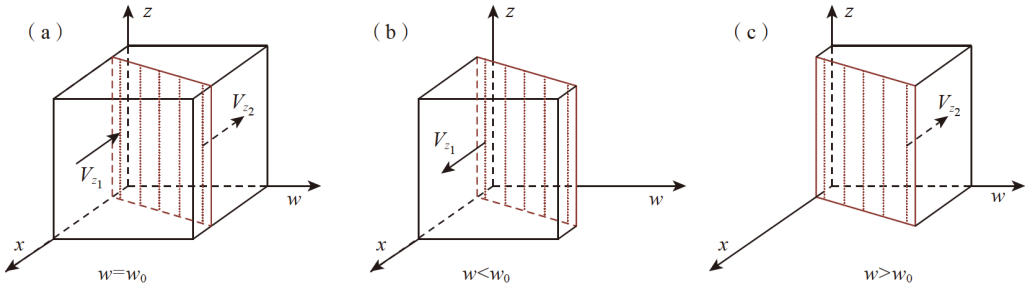


图 5 合约企业策略选择的相位图

Fig.5 Phase diagram of the enterprise strategy selection

性博弈权衡：一方面，高昂的内部运营成本或向碳普惠平台输送利益的额外负担，会显著挤出企业的利润空间，进而抑制其参与动能；另一方面，一旦绿色声誉带来的“品牌溢价”足以对冲上述沉没成本，或者政府的直接注资有效压降了企业的边际投入，其选择“提供奖励”策略的意愿便会迎来显著跃升。

2.4 公众策略稳定性分析

公众选择“参与”或“不参与”的期望收益、复制动态方程和一阶导数分别为

$$\begin{cases} U_w = xyz\left[(1+\alpha)(\beta RP_2+D)+S_{gi}-C_4\right]+ \\ \quad xy(1-z)\left[(1+\alpha)(1-n)D+S_{gi}-C_4\right]+ \\ \quad x(1-y)z\left(\beta RP_2+D+S_{gi}-C_4\right)+ \\ \quad x(1-y)(1-z)\left[(1-n)D+S_{gi}-C_4\right]+ \\ \quad (1-x)yz[(1+\alpha)(\beta RP_2+D)-C_4]+ \\ \quad (1-x)y(1-z)[(1+\alpha)(1-n)D-C_4]+ \\ \quad (1-x)(1-y)z(-C_4+\beta RP_2+D)+ \\ \quad (1-x)(1-y)(1-z)[-C_4+(1+n)D] \\ U_{1-w}=0 \\ \overline{U_w}=wU_w+(1-w)U_{1-w} \\ \quad =w\left(D-C_4-nD+xS_{gi}+\alpha yD+nzD+\right. \\ \quad \left.\beta zRP_2-\alpha nyD+\alpha nyzD+\alpha\beta yzRP_2\right) \end{cases} \tag{16}$$

$$F(w)=\frac{dw}{dt}=w(U_z-\overline{U_z})=-w(w-1)\times (D-C_4-nD+xS_{gi}+\alpha yD+nzD+\beta zRP_2-\alpha nyD+\alpha nyzD+\alpha\beta yzRP_2) \tag{17}$$

$$F'(w)=(-2w+1)(D-C_4-nD+xS_{gi}+\alpha yD+nzD+\beta zRP_2-\alpha nyD+\alpha nyzD+\alpha\beta yzRP_2) \tag{18}$$

由微分方程稳定性定理可知，公众选择“参与”处于稳定状态必须满足：$F(w)=0$且$F'(w)<0$。

命题4：当$y<y_0$时，公众的策略是“不参与”；当$y>y_0$时，公众的策略是“参与”；当$y=y_0$时，无法确定稳定策略。其中，阈值$y_0=[C_4-(1-n)\times D-xS_{gi}-z(nD+\beta RP_2)]/(\alpha D-\alpha nD+\alpha nzD+\alpha\beta zRP_2)$。

证明：令$L(y)=D-C_4-nD+xS_{gi}+\alpha yD+nzD+\beta zRP_2-\alpha nyD+\alpha nyzD+\alpha\beta yzRP_2$，$L'(y)=\alpha D-\alpha nD+\alpha nzD+\alpha\beta zRP_2>0$，因此，$L(y)$是关于$y$的增函数。当$y<y_0$时，$L(y)<0$，$F(w)|_{w=0}=0$且$F'(w)|_{w=0}<0$，则$w=0$具有稳定性；当$y>y_0$时，$L(y)>0$，$F(w)|_{w=1}=0$且$F'(w)|_{w=1}<0$，则$w=1$具有稳定性；当$y=y_0$时，$L(y)=0$，$F(w)=0$且$F'(w)=0$，则$w\in[0,1]$均处于稳定状态，无法确定稳定策略。

命题4表明：公众的策略倾向与平台“游戏化建设”的投入强度之间呈现出显著的正向关系。原因在于，游戏化元素（如积分流转、竞争排名及成就徽章等）构建了一种“心理收益增强机制”，能够通过游戏化带来的趣味性与互动体验来有效提升公众的心理满足感。此外，游戏化建设通过可视化与即时反馈机制，放大奖励系统的感知价值，使得公众能敏锐捕捉到低碳行为背后的潜在经济收益。这种“心理–经济”双重激励的叠加效应，最终促使公众策略从观望转向坚定的实质性参与。

根据命题4，公众策略选择的相位图如图6所示。

在图6中，V_{w_1}部分的体积代表公众“参与”策略的概率；对应地，V_{w_2}体积代表公众选择“不参与”策略的概率，经计算可得

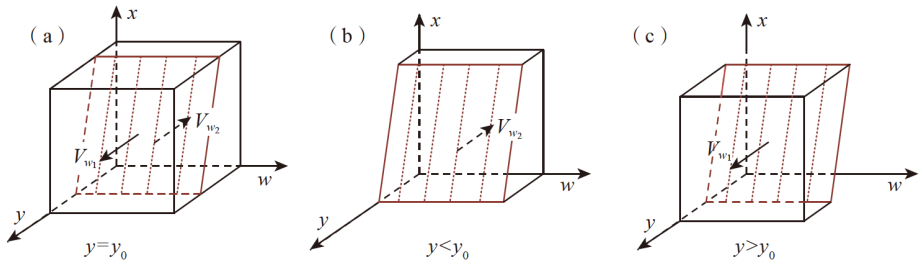


图 6　公众策略选择的相位图

Fig.6　Phase diagram of the public strategy selection

$$V_{w_1}=\int_0^1\int_0^1\frac{C_i-D(1-n)-xS_{\mathrm{gi}}-z(nD+\beta RP_2)}{\alpha D-\alpha nD+\alpha nzD+\alpha\beta zRP_2}\mathrm{d}x\mathrm{d}z$$
$$=\frac{1}{\alpha}\left[\frac{C_i-\frac{S_{\mathrm{gi}}}{2}}{nD+\beta RP_2}\ln\left(1+\frac{n+\frac{\beta RP_2}{D}}{1-n}\right)-1\right] \quad (19)$$

$$V_{w_2}=1-V_{w_1}$$
$$=\frac{\alpha+1}{\alpha}-\frac{\left(C_i-\frac{S_{\mathrm{gi}}}{2}\right)\ln\left[\frac{D+\beta RP_2}{D(1-n)}\right]}{\alpha(nD+\beta RP_2)} \quad (20)$$

推论4：在碳普惠政策中，公众选择“参与”策略的概率与

$$\left\{\left(C_4-\frac{S_{\mathrm{gi}}}{2}\right)/nD+\beta RP_2\ln\left[1+\left(n+\frac{\beta RP_2}{D}\right)/1-n\right]-1\right\}$$

正相关，与α负相关。

推论4表明：公众选择“参与”策略的概率受参与成本、心理满足感、政府补贴及奖励机制等多因素影响。具体来说，参与成本的降低会直接提升公众的参与意愿，而政府补贴的作用呈现出边际递减的规律。公众的减排量通过“碳币”可转化为可量化的收益，心理满足感也可以进一步提高居民对低碳行为的价值感知，从而进一步提升其参与意愿。

3　策略组合稳定性分析

在地方政府、碳普惠平台、合约企业和公众四方博弈的复制动态系统中，四方博弈主体策略组合的稳定性可以根据Lyapunov第一法则判断[11]。多种群演化博弈中的稳定解为严格纳什均衡[11,25]，而严格纳什均衡一定是纯策略。因此，本文对四方演化博弈中的16种纯策略均衡解的稳定性进行分析，即$E_1(0,0,0,0)$、$E_2(1,0,0,0)$、$E_3(0,1,0,0)$、$E_4(0,0,1,0)$、$E_5(0,0,0,1)$、$E_6(1,1,0,0)$、$E_7(1,0,1,0)$、$E_8(1,0,0,1)$、$E_9(0,1,1,0)$、$E_{10}(0,1,0,1)$、$E_{11}(0,0,1,1)$、$E_{12}(1,1,1,0)$、$E_{13}(1,1,0,1)$、$E_{14}(1,0,1,1)$、$E_{15}(0,1,1,1)$、$E_{16}(1,1,1,1)$。其中，$\Omega=\{x,y,z,w\mid 0<x,y,z,w<1\}$。根据各博弈主体的复制动态方程，可得到如下Jacobian矩阵：

$$\mathbf{J}=\begin{bmatrix}(2x-1)A_{11} & x(x-1)S_{\mathrm{gp}} & x(x-1)S_{\mathrm{ge}} & x(x-1)S_{\mathrm{gi}}\\ -y(y-1)S_{\mathrm{gp}} & -(2y-1)A_{22} & y(y-1)\alpha wR(\beta P_2-nP_1) & -y(y-1)\times\\ & & & \alpha R(P_1-nP_1-\beta zP_2+nzP_1)\\ -z(z-1)S_{\mathrm{ge}} & 0 & (2z-1)A_{33} & -z(z-1)G_{\mathrm{e}}\\ -w(w-1)S_{\mathrm{gi}} & -w(w-1)\times & -w(w-1)\times & -(2w-1)A_{44}\\ & \alpha(D-nD+nzD+\beta zRP_2) & (nD+\beta RP_2+\alpha nyD+\alpha\beta yRP_2) & \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中，$A_{11}=C_{\mathrm{g}}-G_{\mathrm{g}}+wS_{\mathrm{gi}}+yS_{\mathrm{gp}}+zS_{\mathrm{ge}}$，$A_{22}=C_{21}-C_{12}-C_{11}+C_{22}+O+xS_{\mathrm{gp}}+\alpha wRP_1-\alpha wnRP_1-\alpha\beta wzRP_2+\alpha nwzRP_1$，$A_{33}=C_3+S_{\mathrm{ep}}-wG_{\mathrm{e}}-xS_{\mathrm{ge}}$，$A_{44}=D-C_4-nD+xS_{\mathrm{gi}}+\alpha yD+nzD+\beta zRP_2-\alpha nyD+\alpha nyzD+\alpha\beta yzRP_2$。由附表2[②]可知，能够成为演化稳定策略（Evolutionary Stable Strategy，ESS）点的只可能有

② 因篇幅所限，相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录 1。

4 个：$E_{10}(0,1,0,1)$、$E_{13}(1,1,0,1)$、$E_{15}(0,1,1,1)$、$E_{16}(1,1,1,1)$。又因为条件1与条件2不能同时满足，条件4与条件6不能同时满足，所以无论什么情况下，都只可能出现一个ESS点，从而能够进行单个可能ESS点的分析。

基于条件4的参数约束，当地方政府采取“积极推进”策略时，系统将收敛于$E_{13}(1,1,0,1)$和$E_{16}(1,1,1,1)$这两个稳定均衡解。在$E_{13}(1,1,0,1)$的非完全合作状态下，碳普惠平台虽采用“游戏化建设”策略，但合约企业因投入成本高于预期声誉收益，选择“不提供奖励”策略。尽管如此，得益于地方政府“积极推进”策略下所提供的补贴兜底效应，加之游戏化元素对公众参与意愿的显著提高，公众选择“参与”策略。此时，系统处于稳定状态。相较之下，$E_{16}(1,1,1,1)$代表更为理想的全员合作的均衡状态，即四方主体均采取积极策略，这标志着多方合作机制的完善，也能进一步实现社会福祉的长远增益。在此情境下，地方政府通过政策引导实现了公信力提升与环境质量改善的双赢；平台借助“游戏化建设”提高了公众参与意愿，间接增加了自身经济收益；合约企业在获取财政补贴的同时，提升了社会责任形象；公众则在物质激励与心理满足的双重驱动下，形成了稳定的低碳行为习惯。

若政府策略转向“消极推进”，即在满足条件6的约束下，复制动态系统将向$E_{10}(0,1,0,1)$和$E_{15}(0,1,1,1)$两个均衡点演化。策略$E_{10}(0,1,0,1)$的存在揭示了一个关键的市场化逻辑：尽管“游戏化建设”初期沉没成本高，但其引流效应带来的公众减排量规模激增，足以支撑平台实现成本覆盖与盈亏平衡。此时合约企业选择“不提供奖励”，映射出其潜在声誉收益尚不足以弥补参与成本的现实困境。与此不同，均衡点$E_{10}(0,1,0,1)$虽共享了地方政府缺位的背景，但合约企业基于对绿色声誉价值的高预期（声誉溢价足以覆盖运营及奖励支出）转而采取“提供奖励”策略。值得注意的是，在$E_{10}(0,1,0,1)$所示的无政府补贴环境下，公众参与的内生动力更多源于低碳行为带来的心理满足感对参与成本的有效对冲。上述两种均衡状态证明，即便缺乏政府的财政补贴，依托“游戏化建设”提升公众活跃度进而提高收益，依然是碳普惠平台实现去补贴化与市场化独立生存的可行路径。

4 仿真分析

4.1 整体演化分析

为更直观地展示复制动态系统中关键要素对多方博弈演化过程及演化结果的影响，本文根据上文的演化博弈模型研究，通过数值仿真对影响演化稳定性的主要参数进行分析，借鉴以往研究的参数赋值方法对本文的参数进行赋值。具体而言，当政府部门选择“积极推进”策略时，需要向碳普惠平台、合约企业和公众提供补贴，分别为$S_{gp}=40$，$S_{ge}=20$，$S_{gi}=3$；此时，政府监管成本$C_g=20$[14]；当碳普惠平台选择“非游戏化建设”策略时，政府部门向碳普惠平台收取罚金$O=50$；当政府部门选择“消极推进”策略时，损失公众口碑$G_g=125$[26]。当碳普惠平台选择“游戏化建设”策略时，付出建设成本和运营成本分别为$C_{11}=50$，$C_{12}=80$；而当其选择“非游戏化建设”策略时，付出建设成本和运营成本分别为$C_{21}=30$，$C_{22}=60$[10]；当碳普惠平台选择“游戏化建设”策略时，会提高公众的低碳行为参与率$\alpha=0.7$；在碳普惠平台中，公众碳减排量兑换“碳币”的比例$\beta=0.4$，“碳币”价格$P_2=0.01$，平台向CCET市场出售碳减排量的价格$P_1=0.005$[27-28]。当合约企业选择“提供奖励”策略时，需要付出成本$C_3=20$，向碳普惠平台提供物质奖励$S_{ep}=10$；当合约企业选择“不提供奖励”策略时，导致的公众参与率降低$n=0.5$。公众选择“参与”策略时，付出的参与成本$C_4=0.02$，产生的碳减排量$R=1.5$，获得的心理满足感$D=1$，选择“不参与”策略时造成的环境损失为$E=6.5$[18,29]。

在保持其他参数不变的前提下，设定各主体初始策略概率x,y,z,w以0为起点，以0.2梯度步长，遍历区间[0,1]进行模拟。四方主体初始策略选择的动态演化轨迹及收敛结果如图7所示。图7（a）表明，随着政府部门“积极推进”初始意愿由0向1递增，系统趋于稳定的时间缩短。这意味着政府的“积极

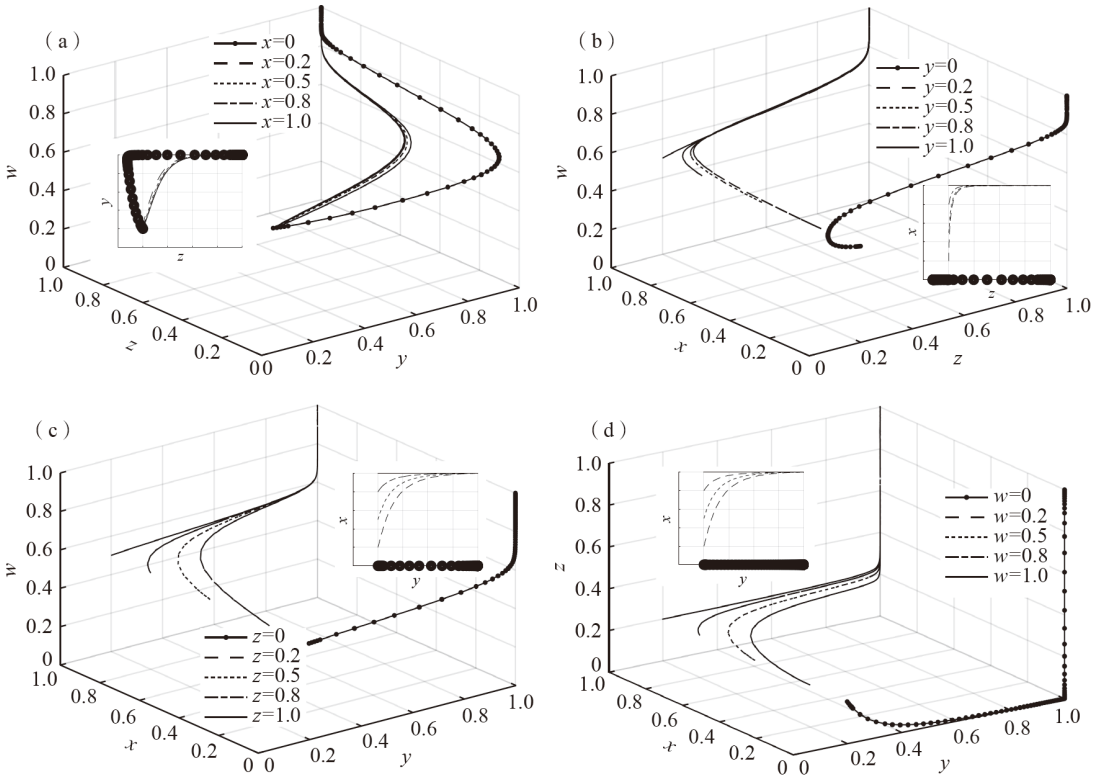


图 7　初始策略概率对演化轨迹的影响

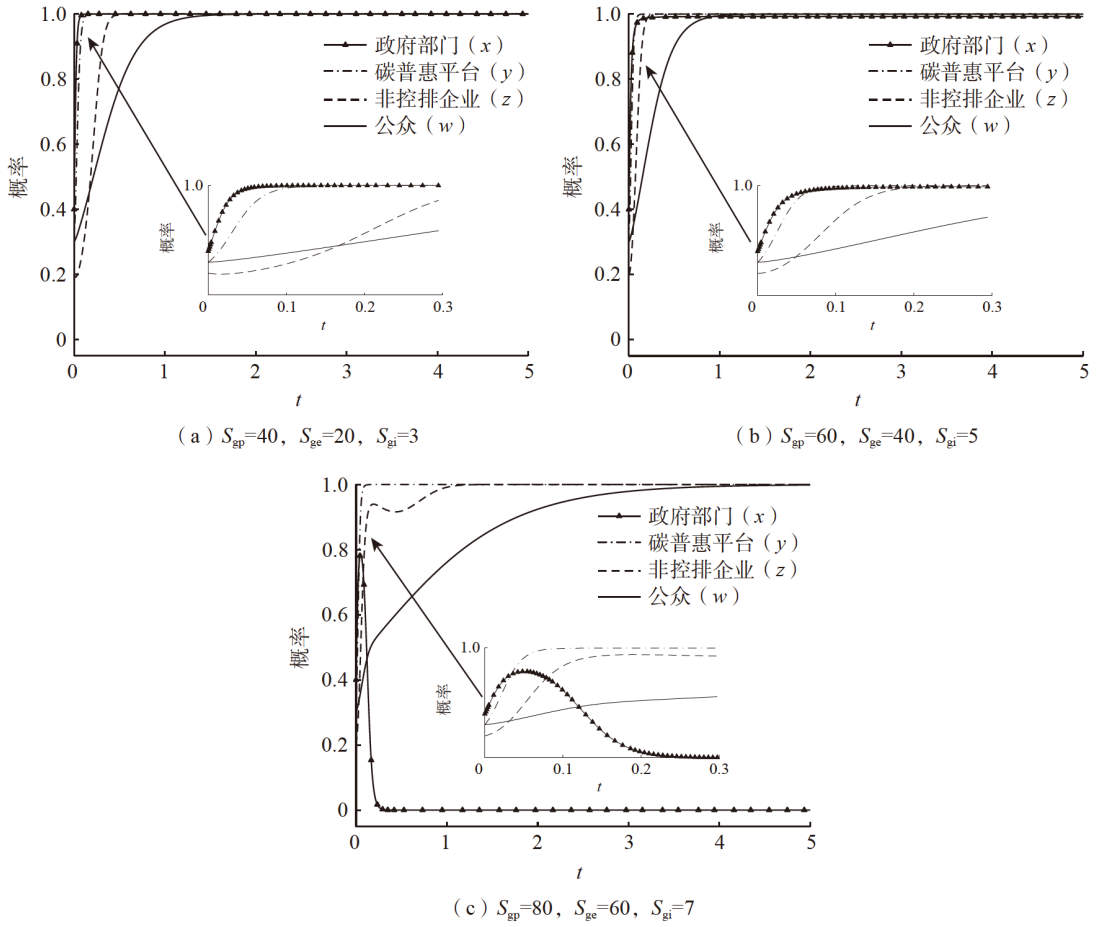
Fig.7　Impact of initial strategy probabilities on evolutionary trajectories

推进”不仅会降低公众与企业的准入门槛，更通过惩罚约束倒逼碳普惠平台采取“游戏化建设”。图7（b）表明，当平台选择“非游戏化建设”策略时，合约企业与公众的行为响应速度缓慢。而平台初始策略值提升，即选择“游戏化建设”的概率增加，不仅会提高合约企业的参与意愿，更能显著促进公众参与度。图7（c）表明，随着合约企业初始参与概率的提升，其提供的物质奖励将打破多方博弈僵局，提升整体参与活跃度。图7（d）表明，当公众选择“参与”策略的初始概率趋近于1时，其低碳参与不仅能直接促进碳减排，还能为其他主体创造更多合作和收益空间，从而实现多方共赢。

4.2　参数敏感性分析

4.2.1　地方政府补贴与惩罚机制的影响

假设地方政府对其余三方的补贴分别为$S_{gp}=\{40,60,80\}$，$S_{ge}=\{20,40,60\}$，$S_{gi}=\{3,5,7\}$，四方博弈主体策略演化过程及结果如图8所示。可以看出，地方政府补贴强度不仅会影响自身策略演化趋势，同时还会影响其余三方策略演化趋势。具体而言，当地方政府向其余三方提供的补贴小于其选择不补贴损失的公众口碑时，地方政府会选择“积极推进”策略。随着地方政府补贴强度的增加，碳普惠平台选择“游戏化建设”策略、合约企业选择“提供奖励”策略及公众选择“参与”策略所需的时间缩短。而当地方政府向其余三方提供的补贴大于其选择不补贴损失的公众口碑时，地方政府选择“消极推进”策略。此时，由于高昂的罚金，碳普惠平台仍然选择“游戏化建设”策略。但合约企业的参与概率出现了波动。这种波动产生的原因可能在于，随着补贴强度难以覆盖参与成本，合约企业会重新评估参与碳普惠政策带来的经济效益。在此情景下，由于合约企业的声誉价值高于其加入碳普惠政策的成本，其仍会选择“提供补贴”策略。对于公众而言，当合约企业的参与概率出现波动时，公众选择“参与”策略需要的时间增加。



（a）S_{gp}=40，S_{ge}=20，S_{gi}=3　　（b）S_{gp}=60，S_{ge}=40，S_{gi}=5

（c）S_{gp}=80，S_{ge}=60，S_{gi}=7

图 8　地方政府补贴策略对各方策略演化的影响

Fig.8　Impact of subsidy intensity by government on the evolution of strategies of various parties

以上结果表明，即使地方政府实施“消极推进”策略，其余主体仍能达到均衡状态，碳普惠政策也能正常运行。而当地方政府实施适当补贴时，其余三方的策略选择速度能够得到有效提高。因此，地方政府应注重平衡政府口碑和财务可持续性之间的关系，在碳普惠政策运营良好的地区可以适当减少或不补贴。

为提高碳普惠平台采取“游戏化建设”策略的投入意愿，本文引入政府惩罚约束$O=\{0,50,100\}$，其对四方主体策略演化的边际影响如图9所示。在缺乏惩罚约束的情境下，受制于压降运营成本以最大化利润的逐利本能，碳普惠平台必然收敛于“非游戏化建设”策略。然而，随着地方政府罚金约束的提升，碳普惠平台采用“非游戏化建设”策略带来的经济代价会倒逼其进行转型，最终选择“游戏化建设”策略。需要指出的是，合约企业与公众的演化路径对此表现出显著的稳定性，即并未受到政府惩罚约束变动的影响。

地方政府实施的罚金机制并非单纯的惩罚手段，而是通过优化平台的成本收益函数，倒逼平台将社会责任内化为经营成本。这种刚性的惩罚约束，不仅能够遏制平台的短期投机行为，更能够确立平台向长期可持续运营转型的制度激励，确保消费端减排政策的有效运转。

4.2.2　合约企业声誉价值的影响

为分析合约企业声誉价值对系统稳定性的影响，本文引入合约企业声誉价值$G_e=\{10,30,50\}$。图10展示了四方主体在不同参数强度下的策略演化轨迹与最终稳定状态。可以看出，当绿色声誉带来的收益尚未完全覆盖合约企业投入成本时，企业倾向于

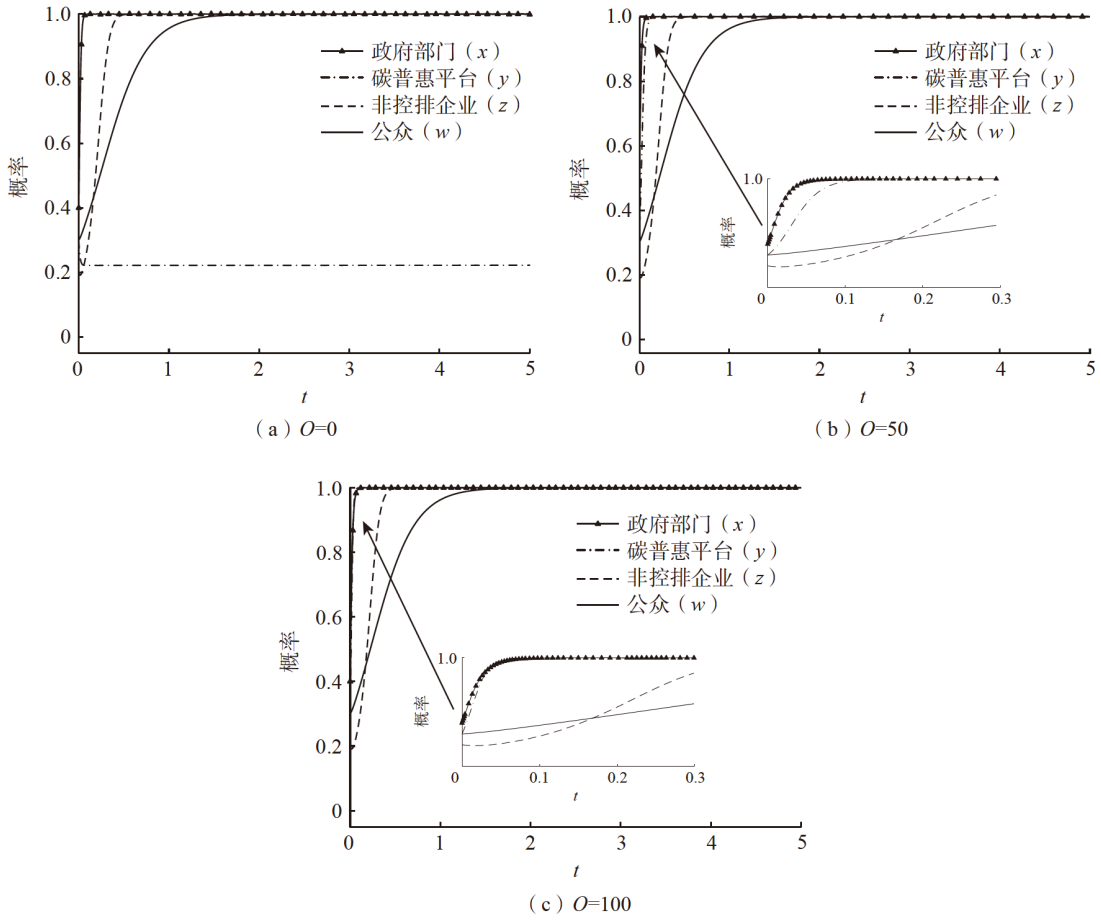


图 9 地方政府惩罚约束对各方策略演化的影响

Fig.9 Impact of local government punishment on the evolution of strategies of various parties

选择“不提供奖励”的保守策略。一旦声誉价值产生的边际效益突破盈亏平衡点，足以抵补企业参与碳普惠政策的投入成本，企业将迅速转向“提供奖励”策略。与此同时，无论是地方政府的“积极推进”策略还是平台的“游戏化建设”策略，其收敛速度与稳态结果均显示出极强的鲁棒性，未因绿色声誉价值的波动而产生显著变化。公众策略选择也对企业策略变化呈现出较强的稳定性，这可能是因为政府补贴和参与低碳行为带来的心理满足感，能覆盖公众参与碳普惠政策的成本，导致企业提供的额外奖励仅发挥补充作用，而非决定性变量。

基于上述敏感性分析，政府部门可以通过向参与主体颁发“社会责任典范”奖项或官方碳减排证书，将原本模糊的声誉价值实体化。这种非货币化的官方背书，不仅能帮助企业更清晰地识别参与碳普惠的好处，更能通过提升声誉收益的感知阈值，有效激活企业向平台提供物质奖励的内生动力。

4.2.3 碳普惠平台奖励机制的影响

为分析碳普惠平台奖励机制对系统稳定性的影响，本文设定碳减排量与“碳币”的兑换系数$\beta=\{0.1,1,5,10\}$，“碳币”单位价值$P_2=\{0.1,1,5,10\}$，参数变动下的四方博弈策略演化轨迹见图11。由于公众获取的物质效用函数由βRP_2构成，β与P_2的增加均会减少公众采取“参与”策略的时间。随着公众响应速度的提升，合约企业的策略演化亦显著提升。这是因为在成本不变的前提下，公众参与率的提升意味着企业获取绿色声誉的概率显著提高，这直接驱动企业更倾向于采取“提供奖励”策略。值得注意的是，平台提高奖励的初衷虽在于通过扩大减排量规模来增加收益，但若“碳币”价值设定过

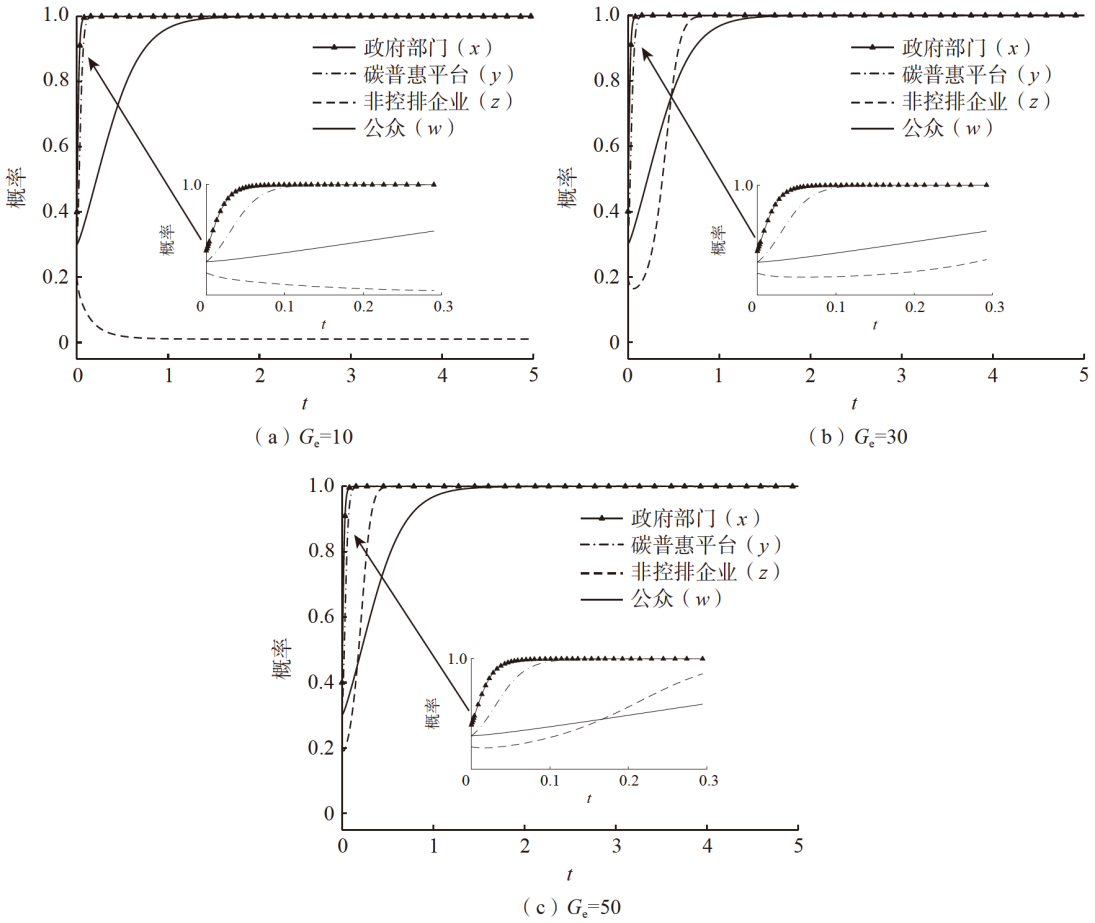


图 10　合约企业声誉价值对各方策略演化的影响

Fig.10　Impact of reputation value of enterprises on the evolution of strategies of various parties

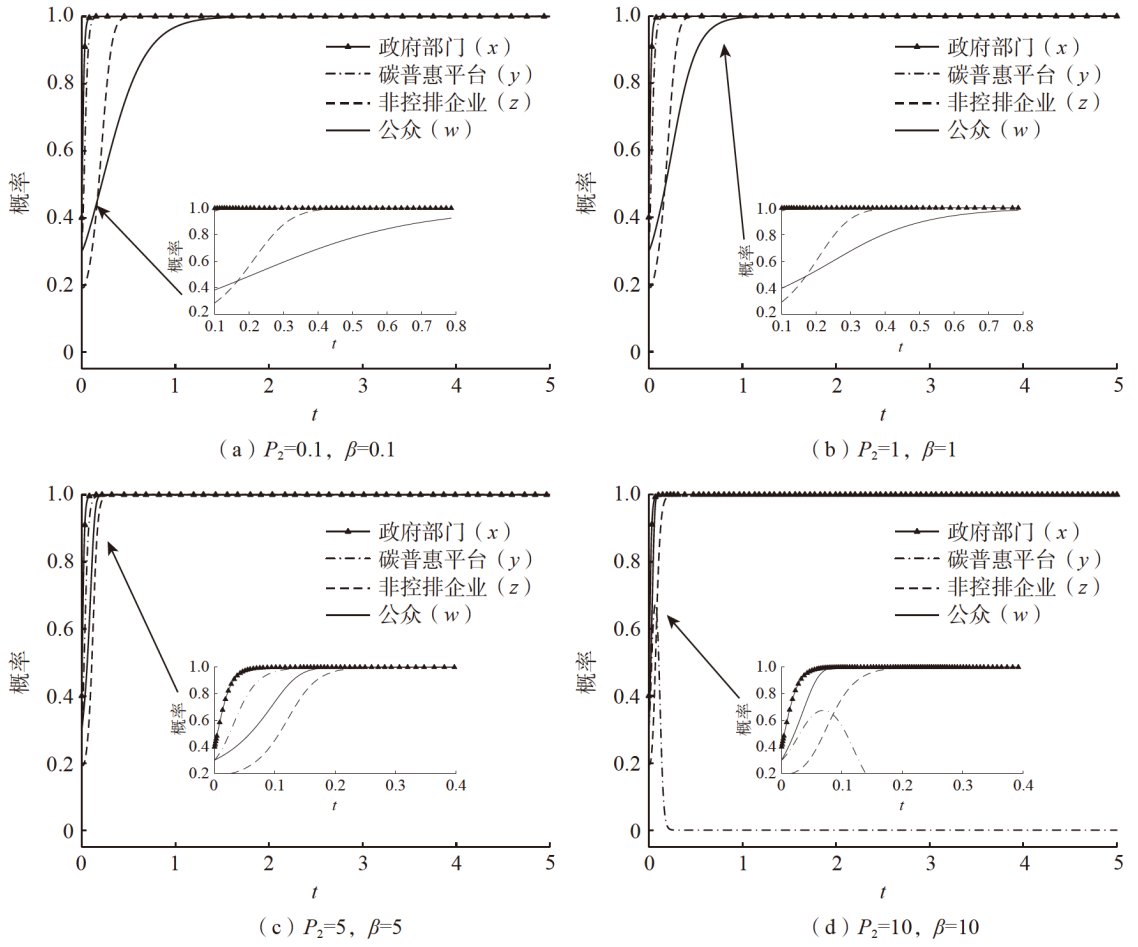
高，也将导致平台运营成本攀升。一旦边际成本突破平台的财务承受阈值，即便存在外部惩罚机制约束，平台仍会发生策略回撤，转而选择“非游戏化建设”策略以规避亏损风险。

基于此，奖励机制的优化不应被视为单一的激励手段，而应被视为调节系统整体效能的杠杆。科学的政策设计必须在“激活公众意愿”与“维持平台运营”之间寻找平衡点，通过构建奖励机制与其他配套政策的联动体系，在确保平台可持续的前提下，最大化释放碳减排的社会效益。

4.2.4　公众参与低碳行为成本的影响

进一步引入公众低碳行为成本变量 $C_4=\{0.02,1,10\}$，图12直观呈现了四方主体在成本约束下的策略演化路径。公众的决策逻辑遵循严格的“净效用最大化”原则，即在低成本区间，心理满足感与预期物质收益的叠加效应能够轻松覆盖投入门槛，驱动主体以极短的时间收敛于“参与”策略；然而，伴随成本曲线的攀升，决策的复杂性与犹豫期显著拉长。一旦综合成本（包括时间消耗、精力投入及机会成本）超过了收益弥补的临界阈值，公众参与意愿将下降，最终导致“不参与”策略成为演化的必然稳态。政府与平台的策略演化表现出对外生成本变量的强鲁棒性，未发生显著偏离；唯有合约企业的策略演化与公众行为呈现出高度的“耦合联动”特征。其深层逻辑在于，公众端的流量降低直接切断了企业获取绿色声誉的唯一通道，这种收益预期的缩减迫使企业必须进行理性止损，同步转向“不提供奖励”策略以规避无效投入。

综上，低碳行为成本构成了维系碳普惠生态正向循环的关键“阀门”。低成本环境是确保流量导

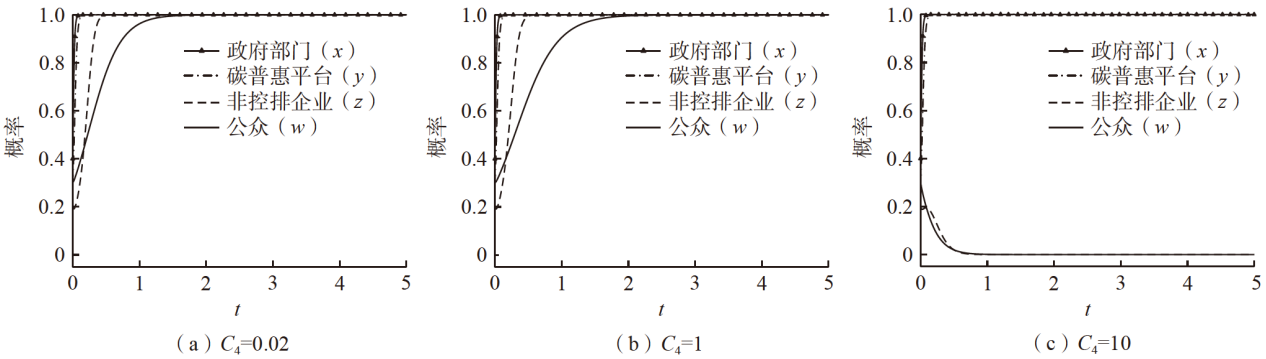


（a）P_2=0.1，β=0.1　（b）P_2=1，β=1

（c）P_2=5，β=5　（d）P_2=10，β=10

图 11　碳普惠平台奖励机制对各方策略演化的影响

Fig.11　Impact of the reward mechanism of carbon generalized system of preference platform on the evolution of strategies of various parties



（a）C_4=0.02　（b）C_4=1　（c）C_4=10

图 12　公众参与低碳行为成本对各方策略演化的影响

Fig.12　Impact of the cost of public participation in low-carbon behaviors on the evolution of strategies of various parties

入与平台良性运转的先决条件，而高企的准入壁垒则是导致系统停摆的诱因。因此，政策优化的重心必须从单纯的“做加法”（增加奖励）转向“做减法”（降低交互门槛），通过精准的场景设计降低公众的参与阻力，方能确保持续且高效的减排产出。

5 结论与政策启示

立足于中国碳普惠制度的本土化制度实践场景，本文将政府规制、平台运营、企业声誉及公众成本等异质性要素，内嵌于四方演化博弈的分析框架，解构多主体策略互动微观机理，不仅揭示了系统演化的动态均衡特征，更提炼出维持政策体系长效运转的内在逻辑规律。主要结论如下：

（1）政府“补贴–惩罚”双轨机制是维持体系运转的枢纽。适度的财政杠杆能有效撬动多方协作，而刚性的惩罚约束则是矫正平台“非游戏化建设”惰性的必要手段；即便面临财政承压或公信力约束导致补贴边际收缩，多主体间的内生博弈仍能维持系统的动态平衡。

（2）公众参与行为对平台激励机制与“碳币”定价策略表现出高度敏感性。虽然提高碳普惠减排量价格能提高居民参与意愿，但过高碳价将挤压平台利润，进而抑制其选择“游戏化建设”的内生动力。

（3）绿色声誉收益构成合约企业策略演化的核心驱动力。只有当声誉带来的边际收益大于其参与成本与奖励支出时，企业才倾向于锁定“提供奖励”策略；反之，则选择理性退出。

（4）低碳行为成本对公众意愿具有显著的阻滞效应。在低成本情境下，公众参与率通常较高并形成正向反馈；然而，一旦低碳行为成本攀升，公众践行低碳行为将受到阻碍。

依据上述研究结论，为促进碳普惠体系的长效运行与制度完善，本文提出以下政策建议：

（1）建立基于公信力约束的“补贴–约束”动态调控体系。在平台初创期，政府应依据区块链、物联网等技术升级的边际成本测算补贴额度，确保财政资金精准覆盖技术溢价；待平台规模效应显现后，应启动补贴梯度退坡机制，规避市场主体的路径依赖。同时，需充分考量区域资源禀赋的差异性，摒弃同质化的激励模式，制定与各地经济发展水平及公众认知程度相适配的差异化策略。

（2）构建碳普惠平台与碳排放权交易市场的价格耦合机制。在利用数字技术完成减排数据确权与公信力重塑的基础上，平台应当构建动态定价模型，使“碳币”价值锚定CCET市场行情。建议以碳配额月度均价为基准，设定浮动区间（如80%～120%）。此外，应引入第三方金融机构或公益资本，拓展多元化融资渠道，增强平台商业模式的可持续性。

（3）健全合约企业环境信息披露与声誉量化评价体系。制定绿色声誉量化标准，将企业参与情况纳入绿色金融与信用评级体系。例如，构建“碳普惠贡献指数”，对指标达标企业自动匹配绿色信贷利率下浮（如5～10个基点）或授信额度上浮（如10%～20%）等政策优惠。通过明确投入产出的转化预期，提升企业参与意愿。同时，鼓励企业深度参与平台顶层设计与规则制定，构建多方共治的协作生态。

（4）优化公众行为激励结构与参与便捷度。为缓解公众的行为疲劳，应引入阶梯式激励机制。例如，采用“基础分+连续打卡系数”的算法逻辑（如连续签到7天系数为1.2，30天系数为1.5），并利用算法推荐低门槛减排行为，确保用户感知的边际收益持续覆盖其时间与精力成本，维持演化系统的正向反馈闭环。

本文基于理性经济人假设与演化博弈理论展开了深入分析，但仍存在以下局限：1）区域异质性刻画不足。地区间经济基础与基础设施的梯度差异将显著影响执行成本与减排绩效，后续研究宜采用面板数据进行细化探讨。2）主体异质性考量有待深化。未来研究应在异质性代理人框架下，解析不同收入阶层与认知水平群体对激励政策的差异化响应，以提升模型对群体策略演化的解释力。3）参数设定的外生性限制。鉴于中国碳普惠仍处于试点探索阶段，现有参数主要依赖文献估算，未来可结合试点微观数据进行参数校准与实证仿真，增强模型的实证有效性。

参考文献

[1] LIAN Y H, LIN X Y, LUO H Y, et al. Distribution characteristics and influencing factors of household consumption carbon emissions in China from a spatial perspective[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119564.

[2] SU X Y, ZHA D L, ZHANG C Q, et al. Does household lifestyle impact the decarbonization effect of carbon generalized system of preferences? Evidence from household survey in China[J]. Journal of Asian Economics, 2025, 98: 101907.

[3] 刘迪一, 刘俊腾, 张国兴, 等. 个体激励型自愿减排机制能否提

升地区碳排放绩效?[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(6): 33–44.

[4] LI J J, LI J, ZHANG J. Can digitalization facilitate low carbon lifestyle? –Evidence from households' embedded emissions in China[J]. Technology in Society, 2024, 76: 102455.

[5] LI S S, JI L Y, WANG Y J, et al. Can China's carbon generalized system of preferences reduce urban residents' carbon emissions? Evidence from a quasi-natural experiment[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 362: 121222.

[6] 中共中央, 国务院. 中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见[EB/OL]. (2023-12-27)[2025-08-15]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11126/202401/content_6928805.html.

[7] 谭彩霞, 耿世平, 谭忠富. “双碳”下基于多机制多主体的中国动态碳价研究[J/OL]. 系统工程理论与实践, 1–25[2025-08-15]. https://link.cnki.net/urlid/11.2267.n.20250224.1017.002.

[8] SI H Y, LI N, DUAN X, et al. Understanding the public's willingness to participate in the Carbon Generalized System of Preferences (CGSP): An innovative mechanism to drive low-carbon behavior in China[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 38: 1–12.

[9] 王世进, 蒯乐伊, 赵丽君. 激励政策对我国新能源汽车推广应用的影响[J]. 技术经济, 2024, 43(4): 64–74.

[10] 叶强, 高超越, 姜广鑫. 大数据环境下我国未来区块链碳市场体系设计[J]. 管理世界, 2022, 38(1): 229–249.

[11] MAYNARD SMITH J. The theory of games and the evolution of animal conflicts[J]. Journal of Theoretical Biology, 1974, 47(1): 209–221.

[12] 董雨, 刘佳旭, 韦玉婷, 等. 碳核查合谋行为的奖惩动态性与时滞性研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(10): 30–44.

[13] 陈文洲, 高明. 基于“绿色账户”激励的回收居民再生资源合作演化[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(12): 159–171.

[14] 刘阳, 张桂涛, 王志远, 等. 废旧共享单车回收策略的四方演化博弈分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(8): 180–192.

[15] 王利莎, 王子琳, 王永昭. 平台生态标签情境下的漂绿行为演化与监管研究[J]. 管理评论, 2025, 37(2): 224–236.

[16] 郑迪文, 谢卫红, 李淑荧, 等. 基于微分博弈的消费者参与下政企合作的数字化转型策略研究[J]. 中国管理科学, 2025, 33(4): 224–234.

[17] 吴凤平, 王维, 虞晖. 考虑用水权交易和阶梯式补贴的工业企业再生水利用决策[J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45(5): 1660–1672.

[18] ZHA D L, SU X Y, AL-SAMHI M M M. Will rebound behaviour diminish the decarbonization potential of carbon generalized system of preferences in China?[J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 47: 474–484.

[19] 翟巍. 消费端碳普惠数据的治理逻辑与规范构造[J]. 上海财经大学学报, 2025, 27(1): 138–152.

[20] 朱昱琳, 刘文玲, 张磊, 等. 推动需求侧碳减排的碳普惠机制：理论与实践[J]. 中国环境管理, 2025, 17(1): 54–65.

[21] 杜松华, 徐嘉泓, 张德鹏, 等. 游戏化如何驱动电商用户绿色消费行为：基于蚂蚁森林的网络民族志研究[J]. 南开管理评论, 2022, 25(2): 191–204.

[22] 杜松华, 徐嘉泓, 罗子婵, 等. 金字塔底层可持续商业模式构建分析：基于粤东北地区的多案例研究[J]. 管理评论, 2018, 30(9): 292–304.

[23] 杨柳青青, 宋程成. 政策设计视角下的政府主导型碳普惠模式研究[J]. 中国行政管理, 2024, 40(1): 18–27.

[24] 杨睿博, 邓城涛, 侯晓舟. ESG表现对企业财务绩效的影响研究[J]. 技术经济, 2023, 42(8): 124–134.

[25] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637.

[26] 郭道燕, 王雪健, 邹绍辉. 碳普惠体系中政府双向税收优惠策略研究[J]. 管理现代化, 2024, 44(4): 180–190.

[27] 刘志, 明晨宇, 郑小雪, 等. “强制+自愿”机制下碳互补供应链合作模式选择与收益分配研究[J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45(7): 2264–2281.

[28] 程永伟, 穆东, 佟雯. 碳交易市场动力学模型及其应用：以广东省为例[J]. 系统科学与数学, 2017, 37(2): 383–392.

[29] 曲卫华, 颜志军. 公众参与下的企业能源消费行为演化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(10): 2537–2548.

Research on the Design of Carbon Generalized System of Preference Based on Multi-Agent Evolutionary Game

SU Xiaoying[1,2,3], ZHA Donglan[1,2,3,*], WANG Mei[1,2,3]

1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Research Center for Soft Energy Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
3. Humanities and Social Sciences Laboratory of Jiangsu Province for Digital Intelligence Management and Low-carbon Operations for Manufacturing System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: As a critical instrument for demand-side decarbonization, the effectiveness of the carbon generalized system of preference hinges on the dynamic equilibrium among multiple stakeholders. This study constructs a four-party evolutionary game including local government, platform operators, contracted enterprise, and the public to analyze the strategic interactions between these groups. The findings indicate that government subsidies are not a prerequisite for system stability. Conversely, rigid penalty mechanisms effectively drive platforms to adopt gamification strategies. For contracted enterprises, strategic evolution is strictly contingent upon the marginal benefits derived from their green reputation. Furthermore, while platform-driven incentives effectively catalyze public low-carbon engagement, the positive effect is attenuated by both the convergence of platform operational cost and the behavioral costs incurred by individuals. These insights reveal the internal dynamics of the carbon generalized system of preference, providing a theoretical foundation for optimizing top-level policy design.

Key Words: carbon generalized system of preference; government subsidies; gamification; emission reduction at the consumption side; quadripartite evolutionary game