

东北黑土地可持续利用的多主体协同路径研究

邢莹¹, 马玉波^{1*}, 滕云^{2*}, 孟莹莹²

(1. 广东科学技术职业学院, 广东 珠海 519090; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 中国东北黑土地退化问题已对区域粮食安全与生态系统稳定性构成系统性威胁, 亟需构建政府主导、企业参与、农户协同的多主体共治机制, 这是实现黑土地资源可持续利用的根本途径。本研究以政府、农业企业及农户为博弈主体, 构建三方动态演化博弈模型, 结合数值仿真对比分析单策略与组合策略下的决策特征及演化趋势。结果表明: 单一政策工具(如政府补贴或企业罚款)对提升农户保护意愿的效果有限, 且容易导致系统策略失衡。相比之下, “高补贴+高罚款”的政策组合能够显著加快系统收敛速度, 有效引导政府、企业和农户三方策略快速趋近“严格监管-绿色生产-积极保护”的理想均衡状态。然而, 补贴额度过高反而会系统偏离最优演化路径。当满足以下条件时, 系统可达到最优稳定状态: 政府监管成本控制在合理区间、企业绿色技术边际收益达到阈值水平、农户补贴额度设置适当。通过政策组合优化强化黑土地保护效能, 构建“政策引导-技术支撑-行为激励”的三维框架, 为东北黑土区综合治理提供了理论依据与实践参考。

关键词: 耕地保护; 黑土地保护; 博弈演化; 仿真分析

中图分类号: F323.211

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)06-0050-14

Research on Multi-subject Collaborative Pathways for Sustainable Utilization of Black Soil in Northeast China

XING Ying¹, MA Yubo^{1*}, TENG Yun^{2*}, MENG Yingying²

(1. Guangdong Polytechnic of Science and Technology, Zhuhai 519090; 2. School of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The problem of black soil degradation in Northeast China has constituted a systematic threat to regional food security and ecosystem stability, and there is an urgent need to construct a multi-subject co-management mechanism led by the government, with enterprise participation and farmer collaboration—a fundamental way to realize the sustainable use of black soil resources. In this study, we take the government, agricultural enterprises and farmers as the game subjects, construct a three-party dynamic evolutionary game model, and analyze the decision-making characteristics and evolutionary trends under single strategies and combined strategies with numerical simulation. The results show that a single policy tool (e.g., government subsidies or enterprise fines) has a limited effect on enhancing farmers' willingness to protect black soil, and is likely to lead to systematic strategic imbalance. In contrast, the policy combination of “high subsidies + high fines” can significantly accelerate system convergence, effectively guiding the strategies of the government, enterprises and farmers to rapidly converge to the ideal equilibrium state of “strict regulation-green production -active protection”. However, the study also finds that excessively high subsidy levels can cause the system to deviate from the optimal evolutionary path. Specifically, the system can reach the optimal stable state when the following conditions are met: government regulatory costs are controlled within a reasonable range, the marginal return of enterprises' green technology reaches the threshold level, and farmers' subsidy levels are set appropriately. By optimizing policy

收稿日期: 2025-05-03

项目简介: 国家社科基金项目(22BJY240); 广东省教育厅科技服务乡村振兴重点领域专项(2023ZDZX4090); 广州市哲学社会科学“十四五规划”2025年度课题(2025GZGJ146)

作者简介: 邢莹(1980-), 女, 副教授, 硕士, 从事农业经济学研究。

通信作者: 马玉波, E-mail: 48351843@qq.com

滕云, E-mail: dingding212139@163.com

combinations to strengthen the effectiveness of black soil protection, a three-dimensional framework of “policy guidance-technology support-behavioral incentives” is constructed, which provides a theoretical basis and practical reference for the comprehensive governance of northeast China's black soil region.

Key words: Arable land protection; Black soil protection; Game evolution; Simulation analysis

东北黑土区作为我国最重要的商品粮生产基地,在保障国家粮食安全方面具有不可替代的战略地位。全球三大黑土区包括乌克兰平原、美国密西西比平原和中国东北平原,其中中国东北黑土区总面积达103万平方公里。该区域以占全国四分之一的粮食产量,养育了超过1亿人口^[1]。得益于其肥沃的土壤特性和独特的生态系统,东北黑土区已成为维护我国粮食供给稳定的关键屏障。作为兼具农业生产和生态保护双重功能的特殊区域,东北黑土区在调节区域气候、涵养水源以及维持生物多样性等方面发挥着重要作用。黑土地因其特殊的形成过程和卓越的肥力特性,在全球粮食安全和生态平衡维护中占据重要地位。实证研究表明,仅黑龙江省和吉林省的黑土耕地就贡献了两省60%以上的粮食总产量,充分彰显了其作为国家粮食安全“压舱石”的核心作用^[2]。

东北黑土地正面临着严峻的系统性风险,这些风险直接威胁区域生态安全和国家粮食安全。多年来的高强度耕作模式、过量施用化肥农药以及保护措施的缺失,导致典型黑土区耕作层正以每年0.3~0.5 cm的速度流失,土壤有机质含量较开垦初期已减少超过50%。当前,土壤侵蚀、酸化、板结等退化问题日益严重,不仅直接影响农作物的产量和品质,更对国家粮食安全的长期保障构成重大威胁^[3]。遥感监测数据表明,黑土区水土流失面积已达区域总面积的34.7%,部分地区甚至出现“破皮黄”等不可逆转的退化现象。这种退化态势已导致粮食单产潜力下降15%~20%,同时引发一系列连锁生态问题,包括土壤碳库流失和生物多样性锐减^[4]。根据当前退化速率预测,若不采取有效措施,未来30年内东北黑土区可能面临基础地力衰竭的系统性危机。造成这一局面的深层次原因在于:在追求粮食增产和经济利益的过程中,政府、企业和农户等利益相关方往往过于注重短期产出,而忽视了土壤资源的可持续利用^[5]。

针对黑土地保护面临的系统性挑战,亟需构建政府主导、企业参与、农户协同的多元共治机制。现有保护模式存在明显局限性:一方面,行政监管手段面临执行成本高、可持续性不足等问

题;另一方面,市场机制难以有效解决环境保护的正外部性困境。学界研究为此提供了多维度的理论支撑:在制度设计层面,完善的法律制度框架和有效的监管体系是保障耕地可持续利用的基础^[6-7]。需要通过健全立法、优化补偿机制和整合财政资源来构建系统性的保护政策体系^[8]。在行为主体层面,研究揭示了当前保护工作中的关键制约因素,包括农户环保意识薄弱和企业短期利益导向等问题^[9]。针对黑土地农田长期玉米连作,有机物料投入严重不足,“重用轻养”导致土壤退化加剧,黑土地可持续利用面临严峻挑战等问题,基于38年定位试验平台,开展了黑土地肥力退化机理与调控关键技术研究^[10]。在实施策略层面,创新性地提出了“三位一体”的保护路径,即通过数量管控、质量管理和生态修复相结合的方式实现黑土地可持续利用^[11]。

基于现有研究成果,构建多元协同的治理体系需要重点解决以下问题:如何平衡行政监管与市场激励的关系^[12];如何建立科学的责任分担和利益分配机制;如何实现保护措施的长效性和可持续性。这些问题的解决将为摆脱黑土地保护困境提供新的思路。本研究通过演化博弈建模和Matlab仿真,构建政府、农业企业和农户三方行为决策模型,量化分析了政府、企业和农户的策略互动规律,可有效解决保护责任分摊、利益分配等核心矛盾,为政策优化提供了理论依据和实践指导。

1 黑土地保护多主体行为决策研究模型构建

1.1 假设提出

假设1:政府作为黑土地保护的主要监管者和政策制定者,在黑土地保护中发挥着至关重要的作用。依据《黑龙江省黑土地保护利用条例》的规定,政府可能采取积极的监管策略,通过制定严格的环保法规、加强执法力度,来严厉打击破坏黑土地资源的违法犯罪行为。同时,政府还将通过政策激励,如提供财政补贴、税收优惠等措施,引导和鼓励农业企业和农户积极参与黑土地保护^[13]。政府策略A={监管激励,不监管激励}。

假设2:农业企业在黑土地保护中扮演着重要的角色,其策略选择直接影响保护措施的实施效果和可持续性。依据《黑龙江省黑土地保护工程实施方案(2021—2025年)》和黑龙江省金融支持黑土地保护措施,农业企业可能倾向于选择提供与绿色生产相关的产品及技术的策略。通过采用绿色农业生产方式,研发和推广环保型农业投入品、采用清洁生产技术等,减少农业生产对黑土地的污染和破坏^[14]。农业企业策略 B={绿色生产,非绿色生产}。

假设3:农户作为黑土地保护的直接参与者和受益者,其决策对黑土地保护的效果具有直接的影响。依据《黑龙江省黑土地保护利用条例》和相关司法实践,农户可能受到政府的激励和引导,选择实施主动保护黑土地的策略。这包括采用科学的耕作方式、减少化肥农药的使用、积极参与黑土地保护项目等措施^[15-16]。农民策略 C={积极保护,消极保护}。

三方主体之间博弈关系如图1所示。

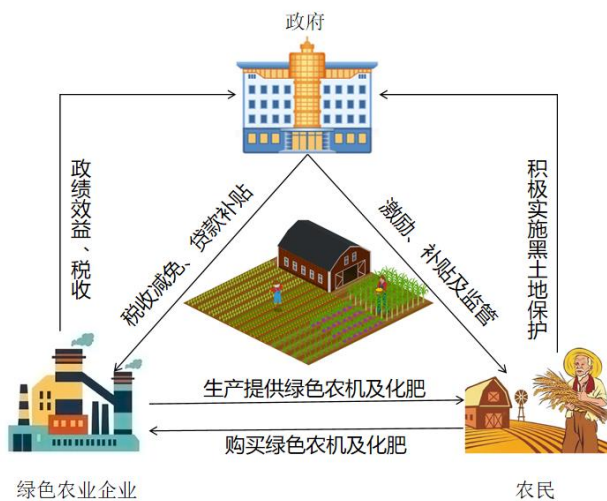


图1 利益相关者间互动关系
Fig.1 Interaction among stakeholders

1.2 主体参数构建与描述

1.2.1 政府相关损益

政府监管激励:政府实施黑土地保护政策需投入监管成本 M_1 (包括人力、物力和财力支出);在激励措施方面,对农业企业提供绿色有机肥生产补贴 H_1 、绿色农机研发专项奖励 H_2 、所得税减免 D_1 、研发税收优惠 D_2 、绿色信贷优惠 A_1 ;对保护黑土地的农户提供贡献奖励 H_3 、成本补贴 H_4 、新能源农机购置补贴 H_5 、秸秆还田专项补贴 A_2 、农业保险保费减免 B 。政府基础收益 R_1 ,对非绿色生产企业处以罚款 P_1 、不保护黑土地农户处以罚款 P_2 ,政府公信力提升 U_1 、黑土地质量提升 U_2 、农产品品质优化 U_3 。

政府不监管激励:若政府采取不监管决策,获得基础收益 R_2 、政府公信力受损 U_1 、加速黑土地退化 U_4 ,农业企业产生政策疑虑 U_5 、农户降低配合意愿 U_6 ,更将产生实质性的环境治理成本 P_3 。

1.2.2 农业企业相关损益

农业企业绿色生产:基本成本 C_1 ,基本收益 S_1 ,额外成本 C_2 (技术研发、设备改造引进)、宣传费用 C_3 、技术培训费用 C_4 ,额外收益 S_2 (绿色产品溢价),获得政府补贴 H_1 、 H_2 ,税收减免 D_1 、 D_2 ,绿色信贷优惠 A_1 ,社会形象提升收益 V_1 ,技术创新带来的长期合作收益 V_2 。

农业企业非绿色生产:基本成本 C_1 ,基本收益 S_1 ,若企业非绿色生产需缴纳政府罚款 P_1 ,同时面临声誉损失 K_1 ,失去农民客户导致的收益损失 K_2 。

1.2.3 农户相关损益

积极保护:基本成本 Q_1 (生产成本),额外成本包括 Q_2 (购买绿色产品)和 Q_3 (购置新能源农机额外投入)、基本收益 W_1 、额外效益包括 W_2 (绿色农产品溢价和品牌价值提升)、 W_3 (增产收益)和 W_4 (长期合作带来的稳定收益);可获得秸秆还田分级补贴(E_1 、 E_2)或秸秆离田量补贴 E_3 ,政府支持包括收入

表1 三方演化博弈的收益组合

Table 1 Combination of benefits in the tripartite evolutionary game

策略组合 Strategy combination	政府收益 Government revenue	农业企业收益 Agricultural enterprise revenue	农户收益 Farm household revenue
(监管、绿色、积极)	$R_1 + U_1 + U_2 + U_3 - H_1 - H_2 - D_1 - D_2 - A_1 - H_3 - H_4 - H_5 - A_2 - B - M_1$	$S_1 + S_2 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + V_1 + V_2 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4 - N$	$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + H_3 + H_4 + H_5 + G + N + A_2 + B - Q_1 - Q_2 - Q_3$
(监管、绿色、消极)	$R_1 + U_1 + U_2 + U_3 + P_2 - H_1 - H_2 - D_1 - D_2 - A_1 - P_3 - M_1$	$S_1 + S_2 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + V_1 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4$	$W_1 - Q_1 - P_2 - F_1 - F_2$

续表 1

Table 1 Continued

策略组合 Strategy combination	政府收益 Government revenue	农业企业收益 Agricultural enterprise revenue	农户收益 Farm household revenue
(监管、非绿色、积极)	$R_1 + U_1 + U_2 + U_3 + P_1 - H_3 - H_4 - H_5 - A_2 - B - M_1$	$S_1 - C_1 - P_1 - K_1 - K_2$	$W_1 + W_2 + W_3 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B - Q_1 - Q_2 - Q_3$
(监管、非绿色、消极)	$R_1 + U_1 + U_2 + U_3 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1$	$S_1 - C_1 - P_1 - K_1 - K_2$	$W_1 - Q_1 - P_2 - F_1 - F_2$
(不监管、绿色、积极)	$R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6$	$S_1 + S_2 + V_1 + V_2 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4 - N$	$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + G + N - Q_1 - Q_2 - Q_3$
(不监管、绿色、消极)	$R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6 - P_3$	$S_1 + S_2 + V_1 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4$	$W_1 - Q_1 - F_1 - F_2$
(不监管、非绿色、积极)	$R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6$	$S_1 - C_1 - K_1 - K_2$	$W_1 + W_2 + W_3 + G - Q_1 - Q_2 - Q_3$
(不监管、非绿色、消极)	$R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6 - P_3$	$S_1 - C_1 - K_1 - K_2$	$W_1 - Q_1 - F_1 - F_2$

补贴 H_3 、生产补助 H_4 和购机补贴 H_5 , 化肥节省金额 G (秸秆还田替代肥料的效果), 以及保险优惠 B 。

消极保护: 基本成本 Q_1 (常规生产成本), 同时需向政府缴纳罚款 P_2 (违规处罚); 产生的不利影响包括 F_1 (粮食减产) 和 F_2 (农产品质量下降)。

基于上述假设, 本研究从各主体的不同策略

入手, 可得搭配 8 种策略组合, 可根据收益组合构建三方博弈收益矩阵, 如表 1 所示。

1.3 政府、农业企业、农户演化博弈均衡性分析

1.3.1 政府激励监管决策复制动态分析

(1) 政府采取“激励监管”与“不激励监管”决策的期望收益 I_{1x} 、 I_{2x} 及平均收益 \bar{I}_x 分别为:

$$I_{1x} = yz[R_1 + U_1 + U_2 + U_3 - H_1 - H_2 - D_1 - D_2 - A_1 - H_3 - H_4 - H_5 - A_2 - B - M_1] + y(1-z)[R_1 + U_1 + U_2 + U_3 + P_2 - H_1 - H_2 - D_1 - D_2 - A_1 - P_3 - M_1] + z(1-y)[R_1 + U_1 + U_2 + U_3 + P_1 - H_3 - H_4 - H_5 - A_2 - B - M_1] + (1-y)(1-z)[R_1 + U_1 + U_2 + U_3 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1] = R_1 + U_1 + U_2 + U_3 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 - y(H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1) - z(H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2 - P_3)$$

$$I_{2x} = yz[R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6] + z(1-y)[R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6] + (1-y)(1-z)[R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6 - P_3] = R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6 + zP_3$$

$$\bar{I}_x = x \cdot I_{1x} + (1-x)I_{2x}$$

$$= R_2 - U_1 - U_4 - U_5 - U_6 + zP_3 + x \left[\begin{aligned} &R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \\ &+ U_5 + U_6 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 \end{aligned} \right] - xy[H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1] - xz[H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2]$$

政府监管决策复制动态方程为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(I_{1x} - \bar{I}_x) = x(1-x)(I_{1x} - I_{2x})$$

$$= x(1-x) \left[\begin{aligned} &R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 \\ &- y(H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1) - z(H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2) \end{aligned} \right]$$

(1) 当

$$y = \frac{R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 - z(H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2)}{H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1}$$

时, $F(x) = 0$, 这意味着无论政府是否实施激励监

(2) 当

管系统均处于稳定状态。

$$y \neq \frac{R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 - z(H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2)}{H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1}$$

时,令 $F(x) = 0$ 得到 $x = 0, x = 1$ 可能是演化稳定策略需要符合 $F(x) = 0$ 且 $F'(x) = 0$ 。
 点。由复制动态方程稳定性定理知, x 作为稳定对 $F(x)$ 求导得:

$$F'(x) = (1 - 2x) \left[\begin{array}{l} R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 \\ - y(H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1) - z(H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2) \end{array} \right]$$

①当

$$y > \frac{R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 - z(H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2)}{H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1}$$

时, $\frac{dF(x)}{dx}|_{x=0} < 0, \frac{dF(x)}{dx}|_{x=1} > 0$ 。故 $x = 0$ 是演化稳定点。
 ②当

$$y < \frac{R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 - z(H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2)}{H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1}$$

时, $\frac{dF(x)}{dx}|_{x=0} > 0, \frac{dF(x)}{dx}|_{x=1} < 0$ 。故 $x = 1$ 是演化稳定点。

1.3.2 农业企业提供绿色生产策略决策复制动态分析
 农业企业采取“绿色生产”“非绿色生产”策略的期望收益 I_{1Y} 、 I_{2Y} 及平均收益 \bar{I}_Y 分别为:

$$\begin{aligned} I_{1Y} &= xz[S_1 + S_2 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + V_1 + V_2 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4 - N] + \\ &\quad x(1 - z)[S_1 + S_2 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + V_1 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4] + \\ &\quad z(1 - x)[S_1 + S_2 + V_1 + V_2 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4 - N] + \\ &\quad (1 - x)(1 - z)[S_1 + S_2 + V_1 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4] \\ &= S_1 + S_2 + V_1 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4 + x[H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1] + z(V_2 - N) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{2Y} &= xz[S_1 - C_1 - P_1 - K_1 - K_2] + x(1 - z)[S_1 - C_1 - P_1 - K_1 - K_2] + \\ &\quad z(1 - x)[S_1 - C_1 - K_1 - K_2] + (1 - x)(1 - z)[S_1 - C_1 - K_1 - K_2] \\ &= S_1 - C_1 - K_1 - K_2 - xP_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_Y &= y \cdot I_{1Y} + (1 - y)I_{2Y} = S_1 - C_1 - K_1 - K_2 - xP_1 + y[S_2 + V_1 + K_1 + K_2 - C_2 - C_3 - C_4] + \\ &\quad xy[P_1 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_2] + yz(V_2 - N) \end{aligned}$$

农业企业“绿色生产”决策复制动态方程为:

$$\begin{aligned} F(y) &= \frac{dy}{dt} = y(I_{1Y} - \bar{I}_Y) = y(1 - y)(I_{1Y} - I_{2Y}) \\ &= y(1 - y)[S_2 + V_1 - C_2 - C_3 - C_4 + K_1 + K_2 + x(P_1 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1) + z(V_2 - N)] \end{aligned}$$

(1)当

$$x = \frac{S_2 + V_1 - C_2 - C_3 - C_4 + K_1 + K_2 + z(V_2 - N)}{P_1 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1}$$

时, $F(y) = 0$, 这意味着无论农业企业是否进行“绿色生产”策略系统均处于稳定状态。
 (2)当

$$x \neq \frac{S_2 + V_1 - C_2 - C_3 - C_4 + K_1 + K_2 + z(V_2 - N)}{P_1 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1}$$

时,令 $F(y) = 0$ 得到 $y = 0, y = 1$ 可能是演化稳定策略需要符合 $F(y) = 0$ 且 $F'(y) < 0$ 。
 点。由复制动态方程稳定性定理知, y 作为稳定对 $F(y)$ 求导得:

$$\begin{aligned} F'(y) &= \frac{dF(y)}{dz} \\ &= (1 - 2y) \left[\begin{array}{l} S_2 + V_1 - C_2 - C_3 - C_4 + K_1 + K_2 \\ + x(P_1 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1) + z(V_2 - N) \end{array} \right] \end{aligned}$$

①当

$$x > - \frac{S_2 + V_1 - C_2 - C_3 - C_4 + K_1 + K_2 + z(V_2 - N)}{P_1 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1}$$

时, $\frac{dF(y)}{dy}|_{y=0} < 0, \frac{dF(y)}{dy}|_{y=1} > 0$ 故 $y = 0$ 是演化稳定点。

②当

$$x < - \frac{S_2 + V_1 - C_2 - C_3 - C_4 + K_1 + K_2 + z(V_2 - N)}{P_1 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1}$$

时, $\frac{dF(y)}{dy}|_{y=0} > 0, \frac{dF(y)}{dy}|_{y=1} < 0$ 故 $y = 1$ 是演化稳定点。

1.3.3 农户实施积极保护黑土地决策复制动态分析
农户采取“积极保护”“消极保护”策略的期望收益 I_{1z}, I_{2z} 及平均收益 \bar{I}_z 分别为:

$$\begin{aligned} I_{1z} &= xy[W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + H_3 + H_4 + H_5 + G + N + A_2 + B - Q_1 - Q_2 - Q_3] + \\ &\quad x(1-y)[W_1 + W_2 + W_3 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B - Q_1 - Q_2 - Q_3] + \\ &\quad y(1-x)[W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + G + N - Q_1 - Q_2 - Q_3] + \\ &\quad (1-x)(1-y)[W_1 + W_2 + W_3 + G - Q_1 - Q_2 - Q_3] \\ &= W_1 + W_2 + W_3 + G - Q_1 - Q_2 - Q_3 + x[H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B] + y(W_4 + N) \\ I_{2z} &= xy[W_1 - Q_1 - P_2 - F_1 - F_2] + x(1-y)[W_1 - Q_1 - P_2 - F_1 - F_2] + \\ &\quad y(1-x)[W_1 - Q_1 - F_1 - F_2] + (1-x)(1-y)[W_1 - Q_1 - F_1 - F_2] \\ &= W_1 - Q_1 - F_1 - F_2 - xP_2 \\ \bar{I}_z &= z \cdot I_{1z} + (1-z)I_{2z} = W_1 - Q_1 - F_1 - F_2 - xP_2 + z[W_2 + W_3 + G - Q_2 - Q_3 + F_1 + F_2] + \\ &\quad xz[P_2 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B] + yz(W_4 + N) \end{aligned}$$

农户“积极保护”决策复制动态方程为:

$$\begin{aligned} F(z) &= \frac{dz}{dt} = z(I_{1z} - \bar{I}_z) = z(1-z)(I_{1z} - I_{2z}) \\ &= z(1-z)[W_2 + W_3 + G - Q_2 - Q_3 + F_1 + F_2 + x(P_2 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B) + y(W_4 + N)] \end{aligned}$$

(1)当

$$y < - \frac{W_2 + W_3 + G - Q_2 - Q_3 + F_1 + F_2 + x(P_2 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B)}{W_4 + N}$$

时, $F(z) = 0$, 这意味着无论农户是否“积极保护”黑土地系统均处于稳定状态。

$$y \neq - \frac{W_2 + W_3 + G - Q_2 - Q_3 + F_1 + F_2 + x(P_2 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B)}{W_4 + N}$$

时, 令 $F(z) = 0$ 得到 $z = 0, z = 1$ 可能是演化稳定点。由复制动态方程稳定性定理知, z 作为稳定策略需要符合 $F(z) = 0$ 且 $F'(z) < 0$ 。对 $F(z)$ 求导得:

$$F'(z) = \frac{dF(z)}{dz} = (1-2z) \left[\begin{aligned} &W_2 + W_3 + G - Q_2 - Q_3 + F_1 + F_2 \\ &+ x(P_2 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B) + y(W_4 + N) \end{aligned} \right]$$

①当

$$y > - \frac{W_2 + W_3 + G - Q_2 - Q_3 + F_1 + F_2 + x(P_2 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B)}{W_4 + N}$$

时, $\frac{dF(z)}{dz}|_{z=0} < 0, \frac{dF(z)}{dz}|_{z=1} > 0$ 。故 $z = 0$ 是演化稳定点。

$$y < - \frac{W_2 + W_3 + G - Q_2 - Q_3 + F_1 + F_2 + x(P_2 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B)}{W_4 + N}$$

②当

时, $\frac{dF(z)}{dz}|_{z=0} > 0, \frac{dF(z)}{dz}|_{z=1} < 0$ 。故 $z = 1$ 是演化稳定点。

1.3.4 政府、农业企业、农户策略演化稳定性分析

在讨论了政府、农业企业、农户三方的博弈仿真的复制动态分析后要对整个演化博弈系统进行三方策略的稳定性分析。当 $F(x) = \frac{dx}{dt} = 0$,

$F(y) = \frac{dy}{dt} = 0, F(z) = \frac{dz}{dt} = 0$ 时, 也就是当整个演化系统的变化率为零时, 此时的三方演化博弈系统处于一种不会因时间的演化而改变策略的稳定状态, 在此根据弗里德曼提出的方法, 微分方程系统的演化稳定策略(ESS)可由该系统的雅可比矩阵局部稳定性分析得到^[7]。系统矩阵为:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-2x) \begin{bmatrix} R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \\ +U_5 + U_6 + P_1 + P_2 - P_3 - M_1 \\ -y(H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1 + P_1) \\ -z(H_3 + H_4 + H_5 + A_2 + B + P_2) \end{bmatrix} & -x(1-x) \begin{bmatrix} H_1 + H_2 + D_1 \\ +D_2 + A_1 + P_1 \end{bmatrix} & -x(1-x) \begin{bmatrix} H_3 + H_4 + H_5 \\ +A_2 + B + P_2 \end{bmatrix} \\ y(1-y)(P_1 + H_1 + H_2 + D_1 + D_2 + A_1) & (1-2y) \begin{bmatrix} S_2 + V_1 - C_2 - C_3 - C_4 \\ +K_1 + K_2 + x(P_1 + H_1 + H_2) \\ +D_1 + D_2 + A_1 + z(V_2 - N) \end{bmatrix} & y(1-y)(V_2 - N) \\ z(1-z)(P_2 + H_3 + H_4 + H_5 + G + A_2 + B) & z(1-z)(W_4 + N) & (1-2z) \begin{bmatrix} W_2 + W_3 + G - Q_2 - Q_3 \\ +F_1 + F_2 + x \begin{bmatrix} P_2 + H_3 + H_4 + H_5 \\ +G + A_2 + B \end{bmatrix} \\ +y(W_4 + N) \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$

在政府、农业企业和农户的复制动态的方程中, 令 $F(x) = F(y) = F(z) = 0$, 知 $E_1(0,0,0), E_2(1,0,0), E_3(0,1,0), E_4(0,0,1), E_5(1,1,0), E_6(1,0,1), E_7(0,1,1), E_8(1,1,1)$ 为局部均衡点。根据雅可比矩阵对特征根的分析可知, 满足系统稳定点的雅可比矩阵特征根要均为非正值, 此时该均衡点才是

稳定点; 当雅可比矩阵所有特征根有正值且确定时, 该均衡点为非稳定点。

博弈系统在 $E_1(0,0,0)$ 时的雅可比矩阵为: 可以得到各均衡点对应的 Jacobian 矩阵的特征值, 如表 2 所示。

表 2 Jacobian 矩阵的特征值
Table 2 Eigenvalues of Jacobian matrix

均衡点 Equilibrium point	特征值 Eigenvalue λ_1	特征值 Eigenvalue λ_2	特征值 Eigenvalue λ_3
$E_1(0,0,0)$	$K_1 - C_3 - C_2 + K_2 + S_2 + V_1$	$F_1 + F_2 + G - Q_2 - Q_3 + W_2 + W_3$	$P_1 - M_1 + P_2 - P_3 + R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6$
$E_2(1,0,0)$	$A_1 - C_2 - C_3 + D_1 + D_2 + H_1 + H_2 + K_1 + K_2 + P_1 + S_2 + V_1$	$M_1 - P_1 - P_2 + P_3 - R_1 + R_2 - 2U_1 - U_2 - U_3 - U_4 - U_5 - U_6$	$A_2 + B + F_1 + F_2 + 2G + H_3 + H_4 + H_5 + P_2 - Q_2 - Q_3 + W_2 + W_3$
$E_3(0,1,0)$	$C_2 + C_3 - K_1 - K_2 - S_2 - V_1$	$F_1 + F_2 + G + N - Q_2 - Q_3 + W_2 + W_3 + W_4$	$P_2 - D_1 - D_2 - H_1 - H_2 - M_1 - A_1 - P_3 + R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6$
$E_4(0,0,1)$	$Q_2 - F_2 - G - F_1 + Q_3 - W_2 - W_3$	$K_1 - C_3 - C_2 + K_2 - N + S_2 + V_1 + V_2$	$P_1 - B - H_3 - H_4 - H_5 - M_1 - A_2 - P_3 + R_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6$
$E_5(1,1,0)$	$C_2 - A_1 + C_3 - D_1 - D_2 - H_1 - H_2 - K_1 - K_2 - P_1 - S_2 - V_1$	$A_2 + B + F_1 + F_2 + 2G + H_3 + H_4 + H_5 + N + P_2 - Q_2 - Q_3 + W_2 + W_3 + W_4$	$A_1 + D_1 + D_2 + H_1 + H_2 + M_1 - P_2 + P_3 - R_1 + R_2 - 2U_1 - U_2 - U_3 - U_4 - U_5 - U_6$

续表 2

Table 2 Continued

均衡点 Equilibrium point	特征值 Eigenvalue λ_1	特征值 Eigenvalue λ_2	特征值 Eigenvalue λ_3
$E_6(1,0,1)$	$Q_2 - B - F_1 - F_2 - 2G - H_3 - H_4 - H_5 - P_2 - A_2 + Q_3 - W_2 - W_3$	$A_1 - C_2 - C_3 + D_1 + D_2 + H_1 + H_2 + K_1 + K_2 - N + P_1 + S_2 + V_1 + V_2$	$A_2 + B + H_3 + H_4 + H_5 + M_1 - P_1 + P_3 - R_1 + R_2 - 2U_1 - U_2 - U_3 - U_4 - U_5 - U_6$
$E_7(0,1,1)$	$C_2 + C_3 - K_1 - K_2 + N + S_2 - V_1 - V_2$	$Q_2 - F_2 - G - N - F_1 + Q_3 - W_2 - W_3 - W_4$	$R_1 - A_2 - B - D_1 - D_2 - H_1 - H_2 - H_3 - H_4 - H_5 - M_1 - P_3 - A_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6$
$E_8(1,1,1)$	$C_2 - A_1 + C_3 - D_1 - D_2 - H_1 - H_2 - K_1 - K_2 + N - P_1 - S_2 - V_1 - V_2$	$Q_2 - B - F_1 - F_2 - 2G - H_3 - H_4 - H_5 - N - P_2 - A_2 + Q_3 - W_2 - W_3 - W_4$	$A_1 + A_2 + B + D_1 + D_2 + H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + M_1 + P_3 - R_1 + R_2 - 2U_1 - U_2 - U_3 - U_4 - U_5 - U_6$

由表 2 可得各均衡点,如表 3 所示。

表 3 均衡点稳定性分析

Table 3 Stability analysis of equilibrium point

均衡点 Equilibrium point	实部符号 Sign of real part	稳定性条件 Stability condition	条件 Condition
$E1(0,0,0)$	(+, +, +)	不稳定点	/
$E2(1,0,0)$	(+, -, +)	不稳定点	/
$E3(0,1,0)$	(-, +, +)	不稳定点	/
$E4(0,0,1)$	(-, +, +)	不稳定点	/
$E5(1,1,0)$	(-, +, -)	不稳定点	/
$E6(1,0,1)$	(-, +, ×)	不稳定点	/
$E7(0,1,1)$	(-, -, -)	ESS	①
$E8(1,1,1)$	(-, -, -)	ESS	②

从表 3 可知,政府、农业企业和农户的动态演化过程中若满足某些条件可以形成稳定点,分别为:

① 当 $C_2 + C_3 - K_1 - K_2 + N + S_2 - V_1 - V_2 < 0, Q_2 - F_2 - G - N - F_1 + Q_3 - W_2 - W_3 - W_4 < 0, R_1 - A_2 - B - D_1 - D_2 - H_1 - H_2 - H_3 - H_4 - H_5 - M_1 - P_3 - A_1 - R_2 + 2U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 < 0$ 时,对农业企业提供绿色生产策略的额外成本、农户主动保护黑土地的额外花费以及政府监管的相关投入,分别与其对应的收益和影响进行了比较分析。具体表现为:农业企业因提供绿色生产策略所产生的额外成本,低于不提供时所面临的声誉损失以及提供后所获得的创新收益;农户用于购买绿色产品的额外支出,小于不采取保护措施时可能产生的不利影响以及实施保护后能够获得的综合效益(包括产品溢价和粮食增产等);政府在不实施监管情况下可能产生的负面影

响(如黑土地退化和公信力下降等),相较于实施监管时通过信贷优惠和补贴支出所带来的监管收益(包括黑土地质量提升和粮食安全保障等)处于劣势。这一分析结果充分反映了农业企业、农户和政府三方在绿色生产与黑土地保护策略中的成本-收益权衡关系。

② 当 $C_2 - A_1 + C_3 - D_1 - D_2 - H_1 - H_2 - K_1 - K_2 + N - P_1 - S_2 - V_1 - V_2 < 0, Q_2 - B - F_1 - F_2 - 2G - H_3 - H_4 - H_5 - N - P_2 - A_2 + Q_3 - W_2 - W_3 - W_4 < 0, A_1 + A_2 + B + D_1 + D_2 + H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + M_1 + P_3 - R_1 + R_2 - 2U_1 - U_2 - U_3 - U_4 - U_5 - U_6 < 0$ 时,企业投入绿色技术研发、设备改造和宣传维护的成本,低于其获得的政策支持(信贷优惠、税收减免和补贴)与市场回报(品牌溢价和合作收益)之和,同时规避了不参与的声誉损失。农户购买绿色农资的支出,可通过政府补贴和企业支持获得补偿,并避免土地退化风险,还能获得产品溢价和增产收益。政府的监管投入(信贷支出、补贴和管理费用)带来的综合效益(税收增长、公信力提升和生态保障)远超不监管导致的生态危机和信任危机。这一机制清晰展现了绿色农业发展中的三方利益平衡。

2 黑土地保护多主体行为决策演化数值实验仿真

2.1 稳定策略演化路径分析

运用 MATLAB R2023b 对政府、农业企业和农户的复制动态方程进行仿真分析。设定三方初始策略概率为 0.1,步长 0.2,共进行 125 次模拟。如图 2 所示,三方策略演化最终收敛于(1,1,1)稳定点,验证了理论分析的准确性。结果表明:①三方

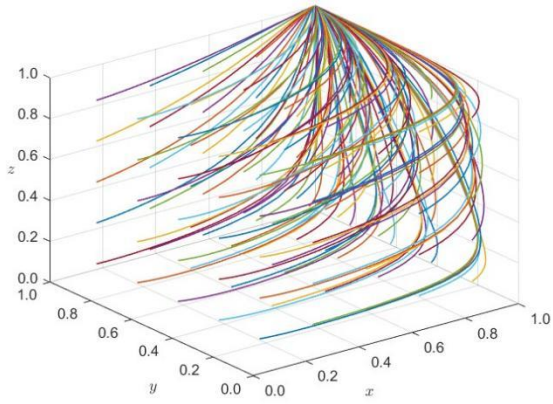


图2 三方策略的演化路径图

Fig.2 Evolution path diagram of tripartite strategies

协同保护模式具有演化稳定性;②为黑土地保护

政策制定提供了量化依据。该研究证实了政府引导、企业参与和农户配合的保护机制可行性,对推动可持续农业发展具有实践价值^[17]。

2.2 关键变量敏感性分析

本研究旨在实现政府、企业和农户三方收益最大化,促使博弈最终达到理想状态(监管、提供绿色技术、保护黑土地)。基于全面质量管理理论,通过约束条件和复制动态方程,运用 Matlab 对三方博弈进行数值模拟分析。研究将根据既定参数设置,验证理想决策状态的稳定性。分别为: $H_1=20, H_2=20, D_1=10, D_2=10, H_3=20, H_4=20, H_5=20, A_2=30, B=20, P_1=50, P_2=50, C_1=300, C_2=100, C_3=50, C_4=20, S_2=10, V_1=50, V_2=50, K_1=30, K_2=20, Q_2=100, Q_3=50, W_2=30,$

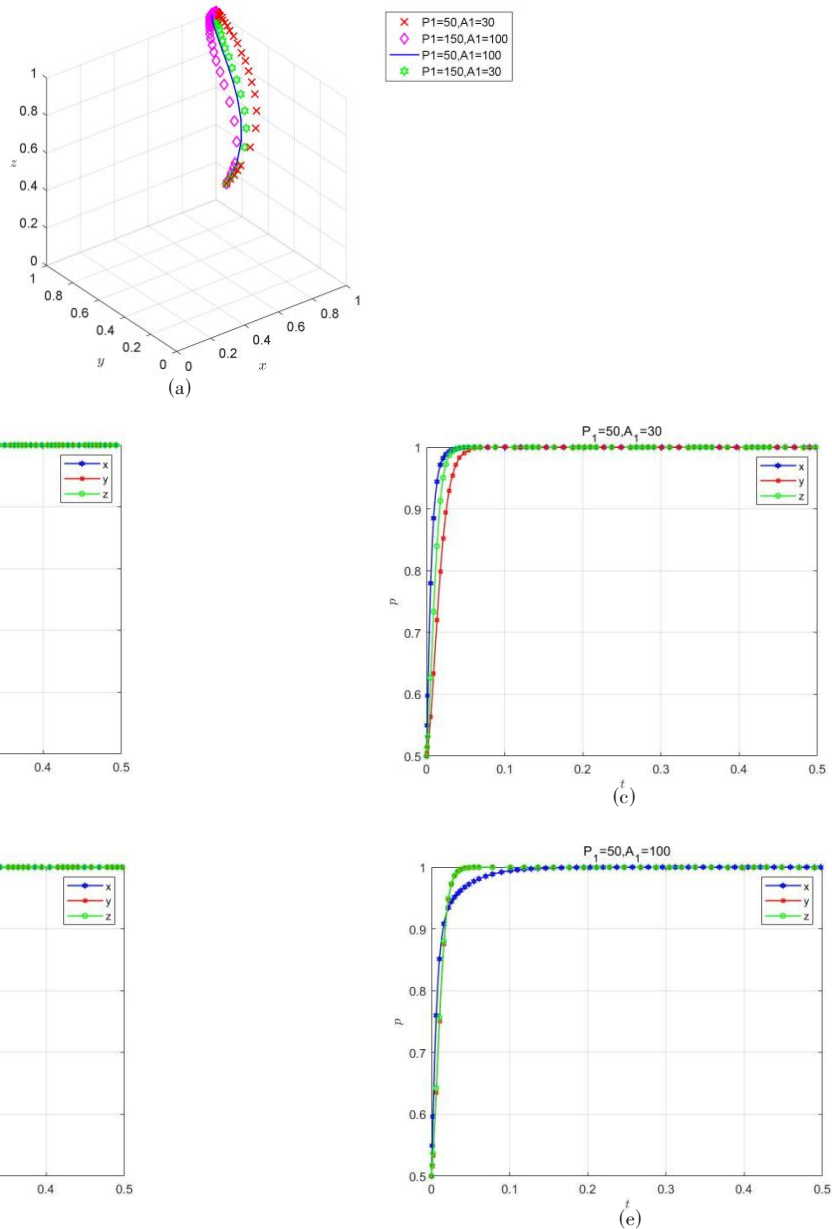


图3 政府给予企业绿色信贷优惠与惩罚变化对演化路径影响图

Fig.3 Impact of changes in government incentives and penalties for green credit on the evolutionary path of enterprises

$W_3=30, W_4=30, G=10, F_1=20, F_2=20, A_1=30, R_1=200, R_1=100, U_1=50, U_2=50, U_3=50, U_4=50, U_5=50, U_6=50, P_3=50, N=20, M_1=100$ 。

(1)政府对企业的惩罚与绿色信贷优惠对演化过程的影响。参数取值分别为 $P_1=50, A_1=30; P_1=150, A_1=100; P_1=50, A_1=100; P_1=150, A_1=30$, 图3显示, 当政府实施监管并提供绿色信贷支持时, 三方系统更快收敛至理想状态。研究表明: ①惩罚力度与收敛速度呈正相关, 高惩罚情景(图3e)下系统最快达到均衡; ②固定绿色信贷优惠时, 惩罚力度增加会延长收敛时间; ③博弈论分析表明, 高惩罚通过提升违规成本直接增加企业绿色生产净收益, 形成正向激励循环。对比低惩罚情景(图3b)可见, 尽管企业最终仍会选择绿色生产, 但因

激励不足导致转型缓慢, 此时需要政府加大监管投入以加速进程。

(2)政府对农户惩罚与补贴对演化过程的影响。以 $x_0=0.6, y_0=0.4, z_0=0.4$ 为例, 参数取值分别为 $P_2=50, H_3=20; P_2=150, H_3=100; P_2=50, H_3=100; P_2=150, H_3=20$ 。图4分析表明: ①适度补贴能促进三方系统向理想状态演化, 但过高补贴会破坏收敛路径; ②固定补贴下, 惩罚力度增加会减慢收敛速度; ③“高惩罚+高补贴”组合(图4c)效果最优, 形成经济激励与制度约束的双重驱动; ④单一高补贴(图4d)易引发道德风险, 降低政策效率; ⑤“高惩罚+低补贴”(图4e)给农户造成了过重的绿色技术成本负担, 导致政策效果最差。研究揭示黑土地保护政策需平衡激励强度与约束力度。

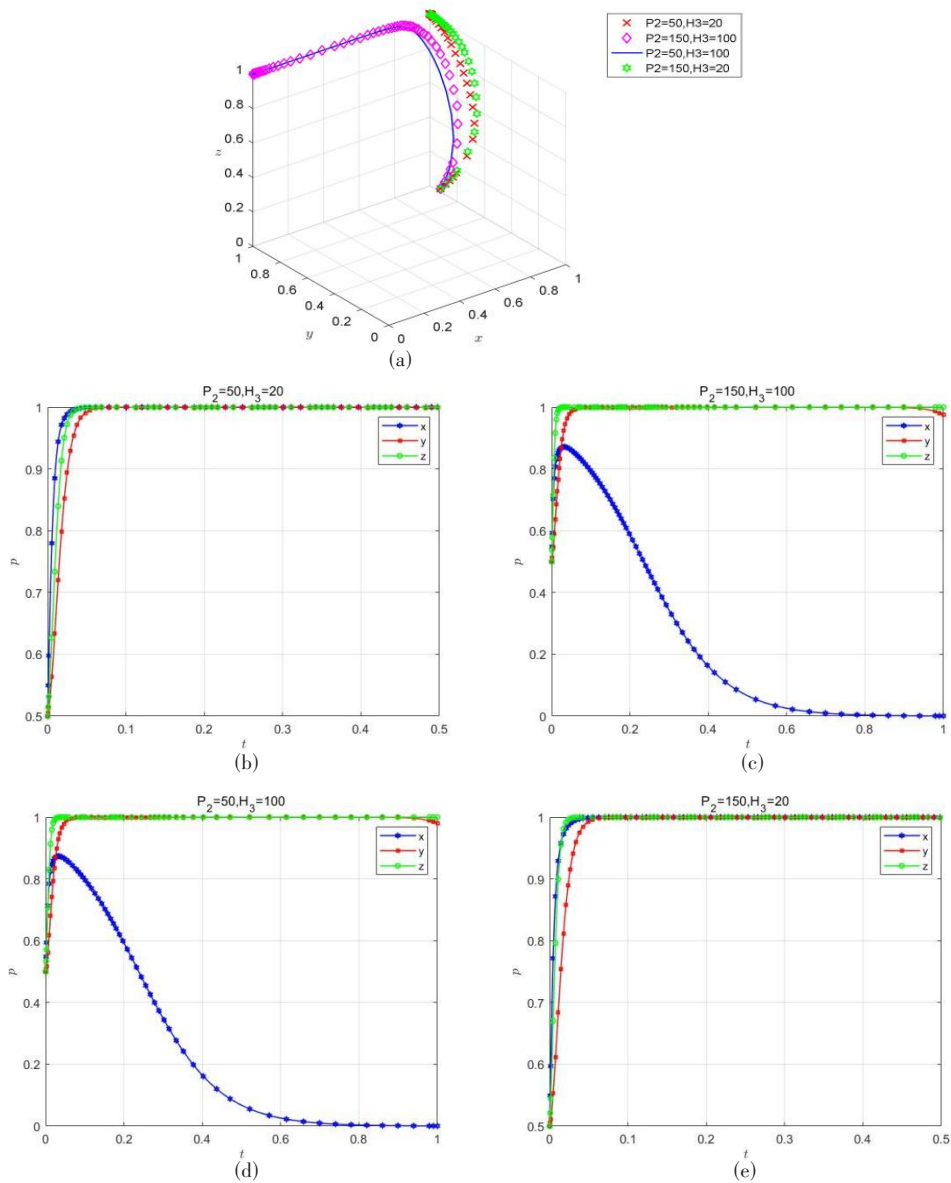


图4 政府给予农户补贴与惩罚变化对演化路径影响图

Fig.4 Impact of changes in government subsidies and penalties on the evolutionary path of farmers

(3)政府监管成本变化对演化过程的影响。以 $x_0=0.6, y_0=0.4, z_0=0.5$ 为例, M_1 取值分别为 220、150、100、20。图 5 分析表明:①适度监管成本能加速三方系统向理想状态收敛;②监管成本 M_1 从 220 降至 20 时,收敛速度显著提升;③但超过临界

值(如 $M_1=220$)后,系统出现螺旋化偏离。适度监管成本形成“低成本-高效率”正反馈,而过高成本会导致“象征性监管”,引发系统波动。研究揭示了监管成本与政策效果的倒 U 形关系。

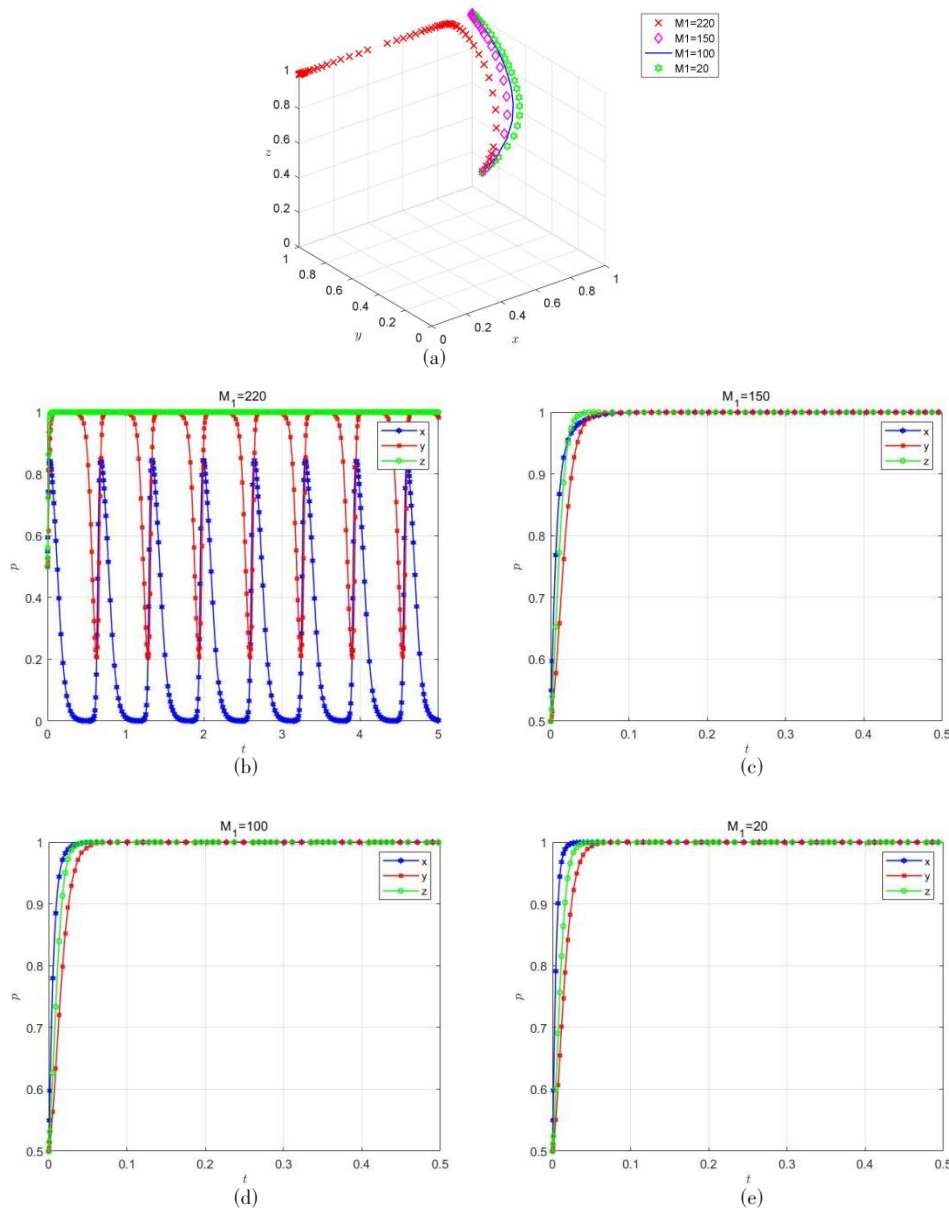


图 5 政府投入监管成本变化对演化路径影响图

Fig. 5 Impact of changes in government investment and regulatory costs on evolutionary paths

(4)政府保险金额变化对演化过程的影响。B 取值分别为 150、110、80、20,图 6 显示,随着政府保险金额增加,三方演化系统收敛速度加快。保险金额 B 从 20 增至 150 时,农户策略更快趋向理想状态。保险机制通过分担风险降低农户采用绿色技术的预期损失,提升其保护意愿。当 B=150 时,农户因“风险厌恶”特性更倾向选择稳定收益

主动保护策略。但政府监管成本增加会形成螺旋形进化轨迹,阻碍系统向理想状态发展。过高的保险金额(如 $B=150$)虽能使农户方加速收敛,却可能导致政府和绿色农业企业财政不可持续,引发系统波动。研究表明,保险金额需在激励效果与财政可持续性之间寻求平衡。

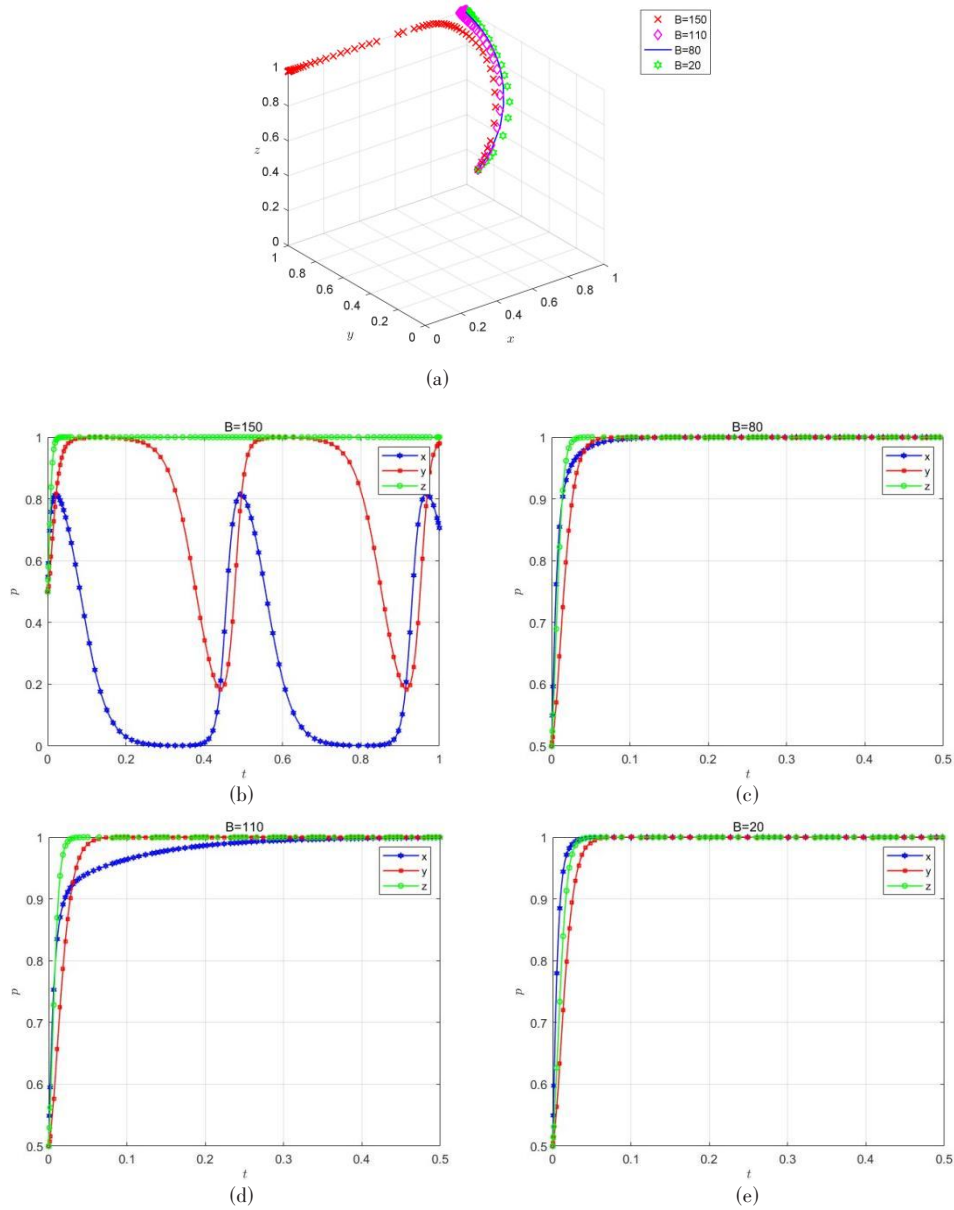


图6 政府投入保险金额变化对演化路径影响图

Fig.6 Impact of changes in government insurance investment on evolutionary path

3 结论与建议

3.1 结论

本研究基于三方演化博弈理论,通过构建政府、农业企业和农户在黑土地保护中的决策互动模型,结合复制动态分析、演化稳定性条件推导及数值仿真实验验证,得出以下主要研究结论:

(1)决策动态分析表明,政府、农业企业和农户三方的策略选择存在相互依存关系。具体而言,政府的监管决策同时受到企业绿色生产决策和农户保护决策的影响;企业的绿色生产决策取决于政府监管力度和农户保护行为;农户的保护决策则受政府监管和企业绿色生产策略的双重影响。

这种复杂的互动关系揭示了在黑土地保护中,必须系统把握三方主体的策略关联性,才能制定有效的保护政策建议。

(2)演化稳定条件分析揭示了各主体参与黑土地保护的经济阈值。对于农业企业,其绿色转型的总投入成本必须低于政府政策支持、市场溢价和长期合作收益的总和。农户方面,采用保护性耕作技术的额外支出需被各类补贴收益、农产品溢价和土地改良效益所覆盖,同时能够弥补不保护带来的潜在损失。政府层面,监管体系的综合成本应当小于监管带来的多重收益,包括直接经济收益、生态效益和社会效益等。只有当各主体的收益成本比达到均衡点时,系统才能实现稳定。

状态。

(3)数值仿真结果验证了三方博弈系统的演化规律。仿真显示:政府监管策略具有显著的主导性和稳定性,其演化轨迹较少受其他主体影响;企业和农户策略均表现出向最优策略收敛的特征,外部扰动仅影响收敛速度而不会改变均衡结果。研究表明,政策设计对系统演化具有关键调控作用:合理的奖惩组合能显著提升收敛效率;适度的监管成本投入和保险支持可加速系统稳定;但过度的农户补贴反而可能导致路径偏离。这提示政策制定需在激励强度和财政可持续性之间寻求平衡,通过精准施策推动系统高效收敛至理想均衡状态。

3.2 建议

按照“理论研究-数学建模-数值仿真”的研究思路,揭示对政府、农业企业和农户3个利益相关主体决策行为的特征与规律,经研究后得出如下建议:

政府层面构建激励约束并重的动态监管体系。(1)优化监管资源配置。根据仿真结果,建议将监管成本控制在一定区间,通过数字化监管平台建设降低人力成本,采用遥感监测等技术手段提升监管效率,避免导致的“监管失效”现象;(2)实施差异化奖惩机制。对农业企业保持高惩罚力度,配合绿色信贷优惠,形成“强约束+高激励”组合;对农户采用政策组合,通过秸秆还田分级补贴实现精准激励;(3)建立可持续保险机制。将保险金额设定在一定区间,实行“基础保险+自愿加保”模式,配套建立保费补贴与土地质量挂钩的浮动费率机制,防范财政风险。

农业企业层面打造绿色技术创新共同体。(1)构建“政策红利-技术研发-市场溢价”的价值链。充分利用税收减免政策,将研发投入强度提升至优化产品产生的效益;通过品牌溢价弥补宣传费用、技术培训费用,开发黑土地农产品溯源系统;(2)建立产学研用协同机制。与高校共建绿色技术实验室,重点突破有机肥增效、新能源农机等关键技术,转化收益按长期合作模式分配;(3)完善风险对冲体系。运用优惠贷款设立绿色技术风险基金,覆盖潜在损失;参与政府PPP项目,共同承担额外成本、技术培训费用中的30%~50%创新成本。

农户层面培育可持续生产方式。(1)推行“行为积分-多维补贴”联动机制。将绿色农产品溢价和品牌价值、轮作和秸秆还田带来的增产、长

期合作带来的稳定预期收益现值化,设计收入补贴、生产补助和购机补贴的阶梯式兑现方案:当秸秆还田率>70%时激活高额补贴,配合化肥替代收益形成经济激励;(2)建立“技术培训-农机共享-保险托底”支持体系。利用C₄培训经费开展保护性耕作示范,设立村级农机合作社降低购置绿色农机的额外投入负担;(3)优化保险条款。建立农户黑土地保护红黑榜,将缴纳罚款的50%用于奖励先进,当土地退化指数超标时启动快速理赔。

参考文献:

- [1] 郑皓洋,黄颖利.基于开放三维生态足迹的中国黑土区耕地可持续利用分析与评价[J].资源科学,2024,46(5):1018-1031. ZHENG H Y, HUANG Y L. Analysis and evaluation of sustainable utilization of cultivated land in China's black soil region based on open three-dimensional ecological footprint[J]. Resources Science, 2024, 46(5): 1018-1031. (in Chinese)
- [2] 韩颖,王峰,韩文锋,等.现代耕作技术在黑土地保护长效机制中的集成应用浅析[J].农场经济管理,2022(1):26-28. HAN Y, WANG F, HAN W F, et al. A preliminary analysis of the integrated application of modern farming technologies in the long-term protection mechanism of black soil[J]. Farm Economic Management, 2022(1): 26-28. (in Chinese)
- [3] 高佳,朱耀辉,赵荣荣.中国黑土地保护:政策演变、现实障碍与优化路径[J].东北大学学报(社会科学版),2024,26(1):82-89. GAO J, ZHU Y H, ZHAO R R. Black soil protection in China: Policy evolution, realistic obstacles and optimization paths[J]. Journal of Northeastern University(Social Science), 2024, 26(1): 82-89. (in Chinese)
- [4] 苗欣然,李泽红,王梦媛.粮食供应安全下东北黑土区耕地利用系统韧性时空演变—以齐齐哈尔市为例[J].资源科学,2023,45(9):1801-1816. MIAO X R, LI Z H, WANG M Y. Spatiotemporal changes of cultivated land use system resilience in the black soil region of northeast China under food supply security:A case study of Qiqihar City[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1801-1816. (in Chinese)
- [5] 曲琛,李文,徐嘉,等.黑龙江黑土地保护利用对碳储量的潜在影响[J].西北林学院学报,2023,38(5):194-203. QU C, LI W, XU J, et al. Potential Impact of black land conservation and utilization on carbon storage in Heilongjiang Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(5): 194-203. (in Chinese)
- [6] 吴晶晶.当代中国政府耕地保护政策研究[D].武汉:华中师范大学,2007.
- [7] 刘桃菊,陈美球.中国耕地保护制度执行力现状及其提升路径[J].中国土地科学,2020,34(9):32-37,4. LIU T J, CHEN M Q. The status-quo and improvement path for the implementation of cultivated land protection policy in China

- [J]. *China Land Science*, 2020, 34(9): 32-37, 4. (in Chinese)
- [8] 张娜, 杜国明, 张瑞. 面向现代农业发展的黑土地质量理论解析[J]. *资源科学*, 2023, 45(5): 926-938.
ZHANG N, DU G M, ZHANG R. Theoretical analysis of black soil quality for the development of modern agriculture[J]. *Resources Science*, 2023, 45(5): 926-938. (in Chinese)
- [9] 刘磊. 粮食安全背景下黑土区保护存在的问题及对策[J]. *现代农业科技*, 2020(22): 200-201.
LIU L. Problems and countermeasures in black soil protection under the background of food security[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(22): 200-201. (in Chinese)
- [10] 赵兰坡, 王鸿斌. 黑土地玉米长期连作肥力退化机理与可持续利用技术创建及应用[J]. *吉林农业大学学报*, 2020, 42(3): 234, 355.
ZHAO L P, WANG H B. The mechanism of fertility degradation in black soil due to long-term continuous cropping of corn, and the creation and application of sustainable utilization technologies[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020, 42(3): 234, 355. (in Chinese)
- [11] 刘洪彬, 李顺婷, 吴梦瑶, 等. 耕地数量、质量、生态“三位一体”视角下我国东北黑土地保护现状及其实现路径选择研究[J]. *土壤通报*, 2021, 52(3): 544-552.
LIU H B, LI S T, WU M Y, et al. Current situation and perspectives of black soil protection from the integrated angle of quantity, quality, and ecology in northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3): 544-552. (in Chinese)
- [12] 曹宏宇, 李飞, 王伊斌, 等. 基于粮食生产能力的耕地非粮化时空演变规律研究[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 1-18[2025-12-31]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0798>.
- [13] 刘桢志, 杨树果. 中国农业绿色低碳发展的时空特征、区域差异及影响因素[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(4): 1094-1104.
LIU A Z, YANG S G. Spatial and temporal characteristics, regional differences and influencing factors of green and low-carbon agricultural development in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(4): 1094-1104. (in Chinese)
- [14] 仇少君, 郝小雨, 赵士诚, 等. 黑土地肥力下降成因与保护利用对策—基于养分资源高效利用视角分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(1): 1-11.
QIU S J, HAO X Y, ZHAO S C, et al. Causes of fertility decline and countermeasures for protection and utilization of upland black soil—an analysis from the perspective of nutrient resources high-efficient utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(1): 1-11. (in Chinese)
- [15] 隋永强, 李政宏. 社会系统研究方法视域下辽宁省黑土地保护利用的实践对策研究[J]. *农业经济*, 2025(1): 107-109.
SUN Y Q, LI Z H. Research on practical countermeasures for the protection and utilization of black soil in Liaoning Province from the perspective of social system research methodologies[J]. *Agricultural Economy*, 2025(1): 107-109. (in Chinese)
- [16] 李岩, 马晶, 杜勇, 等. 科技创新助推农业高质量发展[J]. *农学学报*, 2020(12): 11-13.
LI Y, MA J, DU Y, et al. Technological innovation promotes high-quality development of agriculture[J]. *Journal of Agriculture*, 2020(12): 11-13. (in Chinese)
- [17] 朱立龙, 荣俊美. 药品供应链质量投入与政府分层监管策略研究[J]. *软科学*, 2019, 33(2): 26-31.
ZHU L L, RONG J M. Quality investment and government stratification supervision strategy in drug supply chain[J]. *Soft Science*, 2019, 33(2): 26-31. (in Chinese)

(责任编辑:王昱)