

DOI: 10.20103/j.stxb.202403260631

李源, 王晓荟, 万宇轩, 徐斌. 三方演化博弈下生态工程质量监管机制. 生态学报, 2025, 45(12): 5824-5838.

Li Y, Wang X H, Wan Y X, Xu B. Research on the quality supervision mechanism of ecological engineering under the three-party evolutionary game. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5824-5838.

三方演化博弈下生态工程质量监管机制

李 源¹, 王晓荟¹, 万宇轩², 徐 斌^{2,*}

1 中国林业科学研究院林业科技信息研究所, 北京 100091

2 中国林业科学研究院, 北京 100091

摘要:生态工程的实施是实现可持续发展目标, 实现美丽中国建设目标的重要抓手与途径之一, 生态工程在生态系统修复、生态功能与质量提升、促进区域发展与改善人类福祉等方面发挥重要作用。生态工程质量是检验生态工程实施成效是否符合预期目标的试金石, 对改进生态工程质量相关主体管理办法, 高质量完成生态工程实施目标具有重要指导意义。将生态工程相关的三方主体划分为政府监管部门、生态工程企业和第三方检测机构, 构建生态工程质量监管机制理论分析框架, 建立三方非对称动态演化博弈模型, 对各参与方策略选择的演化稳定性和演化路径进行分析仿真, 探究在生态工程质量监管机制运行中各要素的作用和各参与方博弈演化规律。分析结果表明: (1) 厘清生态工程质量监管主体的决策机制, 确保生态工程质量监管机制满足参与约束与奖惩相容原则, 必须综合考虑生态工程质量监管各参与主体的个人效益最大化与综合效益最大化的问题。 (2) 生态工程的奖惩制度对各参与方形成内生性集体驱动, 对生态工程质量监管具有积极催化作用, 能有效压实各参与方责任, 推动生态工程高质量落实落地, 提升生态工程生态效益。 (3) 生态工程质量监管三方主体的策略选择受多因素耦合驱动, 期望收益与付出成本是决定三方主体行为决策的关键经济性因素, 政府监管部门侧重将生态效益, 社会效益与管理风险管控放在优先位置, 生态工程企业和第三方检测机构通常将自身经济利益放在优先位置。 (4) 生态工程实施区位的生态战略价值与意义的重要程度与紧迫性, 对三方主体在生态工程质量监管, 生态工程质量保障、生态工程质量绩效考核等方面的策略选择具有重要的影响。研究能够为生态工程高质量实施, 保障实现生态工程预期目标, 以及生态工程质量保障体系的相关政策研究提供一定的理论依据。

关键词:生态工程; 三方演化博弈; 奖惩机制; 寻租行为; 仿真分析

Research on the quality supervision mechanism of ecological engineering under the three-party evolutionary game

LI Yuan¹, WANG Xiaohui¹, WAN Yuxuan², XU Bin^{2,*}

1 Institute of Forestry Science and Technology Information, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China

2 Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China

Abstract: The implementation of ecological engineering is one of the important means to achieve the goals of sustainable development and the goal of building a beautiful China. Ecological engineering plays an important role in ecosystem restoration, the improvement of ecological functions and quality, regional development promotion and human well-being improvement. The quality of ecological engineering is the touchstone for testing whether the implementation of ecological engineering meets the expected goals. It has important guiding significance for improving the management methods of the subjects related to ecological engineering quality and completing the implementation goals of ecological engineering with high quality. This paper divides the three parties related to ecological engineering into government regulatory departments,

基金项目: 中央级公益性基本科研业务费专项资助(CAFYBB2021ZB003)

收稿日期: 2024-03-26; 网络出版日期: 2025-04-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Binxu@vip.sina.com

ecological engineering enterprises, and third-party testing agencies, constructs a theoretical analysis framework for the ecological engineering quality supervision mechanism, establishes a three-party asymmetric dynamic evolutionary game model, analyzes and simulates the evolutionary stability and evolutionary path of the strategy selection of each participant, and explores the role of each factor in the operation of the ecological engineering quality supervision mechanism and the game evolution law of each participant. The analysis results show that: (1) To clarify the decision-making mechanism of the ecological engineering quality supervision subject and ensure that the ecological engineering quality supervision mechanism meets the improvement of ecological functions and quality, it is necessary to comprehensively consider the issue of maximizing the personal and comprehensive benefits of each participant in the ecological engineering quality supervision. (2) The reward and punishment system of ecological engineering forms an endogenous collective drive for all participants, which has a positive catalytic effect on the quality supervision of ecological engineering, can effectively consolidate the responsibilities of all participants, promote the high-quality implementation of ecological engineering, and improve the ecological benefits of ecological engineering. (3) The strategic choices of the three parties in the quality supervision of ecological engineering are driven by multiple factors. Expected benefits and costs are the key economic factors that determine the behavioral decisions of the three parties. Government regulatory departments focus on giving priority to ecological benefits, social benefits and management risk control, while ecological engineering companies and third-party testing agencies usually give priority to their own economic interests. (4) The importance and urgency of the ecological strategic value and significance of the location of ecological engineering implementation have an important impact on the strategic choices of the three parties in the quality supervision of ecological engineering, ecological engineering quality assurance, and ecological engineering quality effectiveness assessment. This study can provide a certain theoretical basis for the high-quality implementation of ecological engineering, the realization of the expected goals of ecological engineering, and the relevant policy research on the quality assurance system of ecological engineering.

Key Words: ecological engineering; three-party evolutionary game; reward and punishment mechanism; rent-seeking behavior; simulation analysis

生态系统是人类生存和发展的基础本底,为人类提供必要的物质基础^[1],近几十年来全球生态系统受人类活动、气候变化和海平面上升的影响,全球生态系统退化和生态系统恶化形势日益加剧,生态系统治理与生态功能保持任务艰巨且迫在眉睫。联合国组织呼吁各方共同履行《联合国气候变化框架公约》《生物多样性公约》^[2]等约定的生态保护责任,以应对生物多样性丧失、气候变化和生态恶化等生态危机;联合国先后启动了“可持续发展十年”“生态系统恢复十年”“海洋科学促进可持续发展十年”等行动,在未来一段时期内通过修复受损生态系统,提升生态功能和质量和改善人类福祉^[3-4]。为保护和修复生态系统,世界各国积极开展一系列不同尺度下的生态工程措施修复生态系统,例如前苏联的“斯大林改造大自然计划”、美国的“罗斯福工程”、加拿大的“绿色计划”、非洲“五色坝工程”、韩国“治山绿化计划”和澳大利亚的“整体流域开发管理”等^[5-9]生态工程措施。中国 1970 年伊始进入生态治理的起步阶段,2000 年左右进入生态工程建设修复生态系统的高速发展阶段,1970 年至今陆续启动了一系列重大生态建设工程项目,如黄河流域综合治理^[10]、三北防护林工程^[11]、天然林保护工程^[12]、退耕(草)还林工程^[13]、三江源生态保护区建设^[14]、西藏生态安全屏障建设^[15]和山水林田湖草沙一体化保护和系统治理^[16]等。中国通过一系列的生态工程建设,生态系统质量得到了一定程度的恢复和提升^[17],然而经济发展与生态保护之间,人与自然之间的地缘矛盾与冲突仍然长期存在;生态工程建设实施是一个长期的生态治理政策实施过程^[18],受地区自然气候环境差异,自然资源本底差异、生态工程质量监管执行力度和社会经济发展水平等多方面的影响,致使生态工程实施成效差异巨大,因此,提高对生态工程建设各参与方的监管,真抓实干地对生态工程实施成效进行科学评估,因地制宜的决策调整是制定生态工程修复与管理长效计划的关键^[19-21]。

相关学者针对生态工程多样性的特征,基于其特有的生态学、经济学和社会学属性,构建了一套全面系统的生态工程效应评价体系。综合运用遥感技术、统计年鉴资料、实地监测站数据以及问卷调查结果等多元数据指标,对生态工程进行了深入细致的分析。然而,由于评估目标的多样性、指标层次的复杂性、数据来源的异质性、指标量化以及评估方法的差异性,不同评估主体在运用该体系进行生态工程效应评估时,得出的结果存在显著的不确定性^[22-25]。这些研究为本研究奠定了文献基础与研究思路借鉴,目前针对生态工程质量的相关研究仅包含生态工程质量管理^[26],生态工程质量监督^[27]和生态工程质量时空变化^[28]等研究,缺少对生态工程建设监督管理方,工程实施方和项目验收方的监管措施,造成了生态工程建设过程中的资本投入与生态成效自相矛盾等问题。我们发现博弈理论被广泛运用于产品质量多方协同监管^[29],协同治理^[30]、信息化平台监管^[31]、水资源管理^[32]和应对突发公共事件^[33]等相关研究,生态工程质量监管是确保生态工程质量标准化,规范化的关键环节。生态工程质量监管是生态工程实现提升生境质量,促进生态平衡的重要手段,对推动相关单位和企业不断提高管理水平和技术水平,促进行业健康发展具有重要的驱动作用^[34-35]。

为了丰富对生态工程质量监管机制中各参与方的研究,以期能够本研究运用三方演化博弈的方法,力求厘清生态工程质量监管过程各参与方的动态关系以及互动模式,更好地理解生态工程质量监管各参与方之间复杂的利益博弈和决策机制。本研究运用 Matlab2023a 进行仿真分析,深入洞见地验证各参与方在不同初始条件下的生态工程质量监管中的策略选择,分析各参与方动态博弈关系的有效性,为生态工程质量监管决策的有效实施和持续改进提供理论支持与实践指导。本文的边际贡献包括:一是从研究内容上丰富了生态工程质量监管中各参与方互动关系的研究;二是基于各参与方利益最大化视角结合三方演化博弈模型深化拓展了生态工程质量监管运行机制研究的分析视角;三是采用三方博弈论仿真分析方法探究了生态工程质量监管中各参与方的运行机制研究。本研究不仅厘清各参与方的动态博弈关系,而且预设了在不同的生态工程质量监管模式下各参与方的稳定策略组合,这不仅有助于从理论上厘清生态工程质量监管各参与方的行为决策,也是从实践上为优化不同背景下的生态工程质量监管政策提供理论依据与政策参考。

1 模型构建与假设

1.1 模型构建

生态工程质量监管和工程质量检测是保障高质量生态工程实施的关键,是实现“双碳”目标的必要抓手,是践行“两山”理论建设美丽中国实现绿色可持续发展战略的重要手段之一。本研究构建了政府监管部门、生态工程企业和第三方检测机构的三方演化博弈主体(图 1)。首先,本研究考虑了生态工程企业和第三方检测机构可能存在寻租行为,构建了政府监管部门、生态工程企业、第三方检测机构之间的三方演化博弈模型,分析了各参与方的策略稳定性和各要素对策略选择的影响关系;然后,对复制动态系统的纯策略和混合策略均衡点进行了稳定性分析检验,得出不同条件下的演化稳定策略组合;最后,利用 Matlab2023a 进行了仿真分析,验证了不同初始条件下模型分析的有效性,并根据研究结论为生态工程质量监管机制提出了不同的对策与建议。

1.2 模型假设

本研究基于对三方博弈参与主体的策略集合、收益函数等分析,对各参与方策略和均衡点的稳定性与各要素的关系,作出如下假设。模型参数及含义见表 1。

假设 1:政府监管部门,生态工程企业、第三方检测机构三方均为有限理性参与主体,各主体的策略选择随时间的变化逐渐演化为稳定的最优策略。政府监管部门的策略选择为 $F=(F1,F2)=(\text{严格监管},\text{宽松监管})$,并以 x 的概率选择 $F1$,以 $(1-x)$ 的概率选择 $F2$, $x \in [0,1]$;生态工程企业的策略选择为 $H=(H1,H2)=(\text{高质量生态工程},\text{低质量生态工程})$,其选择 $H1$ 的概率为 y ,选择 $H2$ 的概率为 $(1-y)$, $y \in [0,1]$;第三方检测机构的策略选择为 $K=(K1,K2)=(\text{拒绝寻租},\text{意向寻租})$,并以 z 的概率选择 $K1$,以 $(1-z)$ 的概率选择 $K2$, $z \in [0,1]$,其中 x,y,z 均为时间 t 的函数。

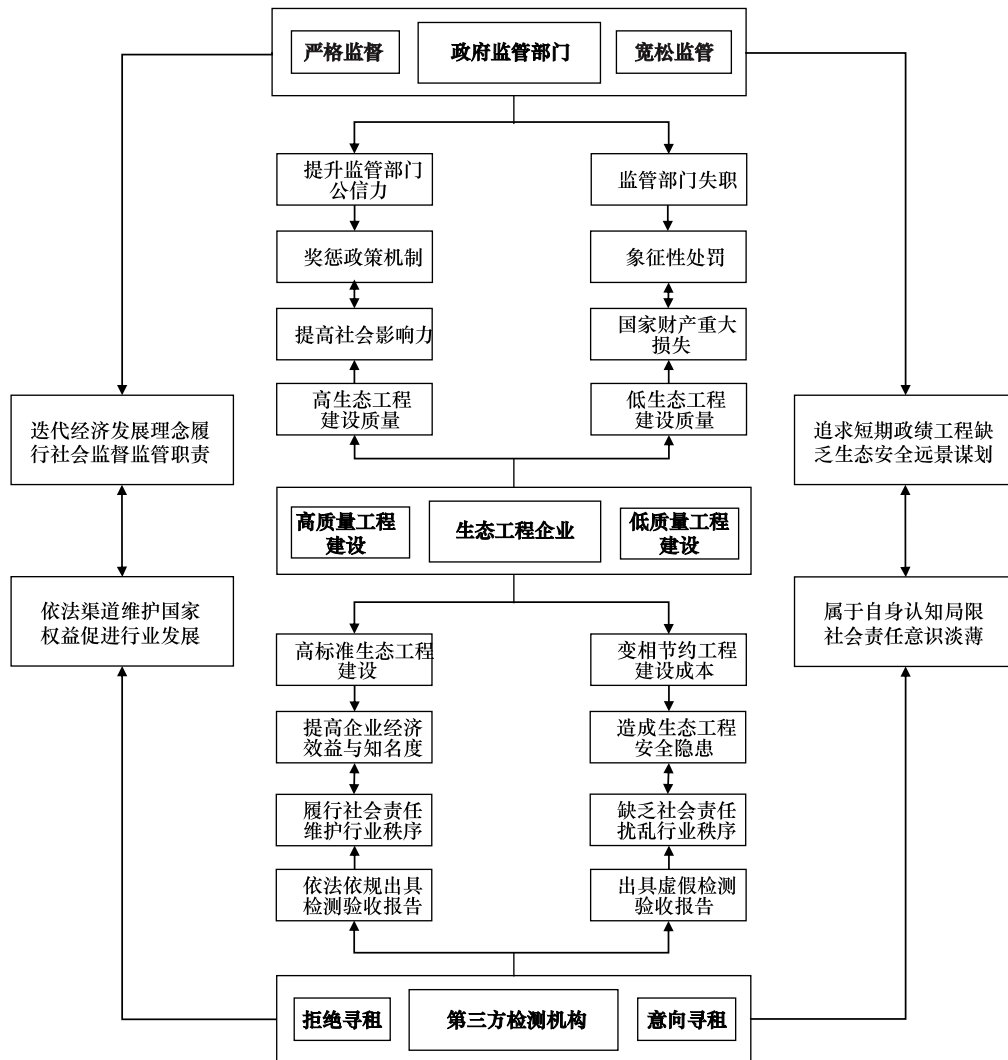


图1 三方演化博弈模型逻辑关系图

Fig.1 Logic relationship diagram of three-party evolutionary game model

假设2:当政府监管部门严格监管时的成本和收益分别为 C_1 和 E_1 ;此时,意向寻租的第三方检测机构则会被处以罚款 F_1 ;生态工程企业进行低质量生态工程建设,则会被处以罚款 F_2 ;若生态工程企业进行高质量生态工程建设则会获得奖励 R_1 ;政府监管部门给予拒绝寻租的第三方检测机构奖励 R_2 。当政府监管部门宽松监管时,无从获得生态工程企业和第三方检测机构的策略选择信息,政府监管部门将不采取奖惩措施。

假设3:生态工程企业高质量生态工程建设的成本为 C_2 ,低质量生态工程建设的成本为 C_3 , $C_2 > C_3$ 。生态工程企业顺利通过项目验收之后的收益为 E_2 ,当生态工程企业进行高质量生态工程建设时,工程质量检验合格。当生态工程企业进行低质量生态工程建设时,会向第三方检测机构寻租,以求通过检测获得验收通过许可,寻租成本为 C_4 , $C_4 < (C_2 - C_3)$,生态工程企业进行低质量生态工程建设的投机成本为 C_5 ,包括伪造工程建设物料表,虚报价格、虚假宣传工程质量等费用。

假设4:当生态工程建设完成时,经第三方检测机构检测合格后方能通过项目验收,检测不合格无法通过验收,第三方检测机构的检测收益为 E_3 ,第三方检测机构的检测成本为 C_8 。若生态工程企业进行低质量生态工程建设时第三方检测机构拒绝寻租,生态工程项目检测不合格无法通过项目验收。若第三方检测机构意向寻租,与企业达成寻租协议帮助低质量生态工程建设企业获得项目验收合格报告,则第三方检测机构意向寻租的投机成本为 C_5 ,包括伪造工程质量检测记录、出具虚假验收合格报告等费用;第三方检测机构的意向

寻租收益为 E_4 。

假设 5:生态工程企业进行高质量生态工程建设,为生态系统功能恢复和经济发展创造有利条件,提高政府公信力为政府带来社会收益为 E_5 。生态工程企业进行低质量生态工程建设,并且与第三方检测机构达成寻租协议时,低质量生态工程通过项目验收,政府监管部门为保障生态安全 and 经济发展,支出生态修复和整顿生态工程行业的成本为 C_7 。政府监管部门采取宽松监管策略导致监管失灵,造成低质量生态工程通过项目验收时,政府监管部门面临上级主管部门追责和行政处罚的金额为 F_3 。

表 1 演化博弈模型主要参数及其含义

Table 1 Main parameters of the evolutionary game model and their meanings

参数 Parameter	释义 Meaning
E_1	政府监管部门严格监管策略时的收益为 E_1
C_1	政府监管部门执行严格监管策略的成本为 C_1
E_5	生态工程企业进行高质量生态工程建设时,为政府带来公信力提升与社会效益 E_5
C_7	政府监管部门失职时,进行生态修复费用与整顿生态工程行业的成本 C_7
F_3	政府监管部门面临上级主管部门的追责以及行政处罚金额为 F_3
E_2	生态工程项目顺利通过验收之后生态工程企业的收益为 E_2
C_2	生态工程企业进行高质量生态工程建设时的成本为 C_2
C_3	生态工程企业进行低质量生态工程建设时的成本为 C_3 , $C_2 > C_3$
C_4	生态工程企业进行低质量生态工程建设时,向第三方检测机构寻租的成本为 C_4 , $C_4 < (C_2 - C_3)$
C_5	生态工程企业进行低质量生态工程建设时的投机成本为 C_5
R_1	政府监管部门给予进行高质量生态工程建设企业的奖励 R_1
F_2	政府监管部门严格监管对建设低质量生态工程企业的罚款 F_2 。
E_3	第三方检测机构的检测收益为 E_3
C_8	第三方检测机构的检测成本为 C_8
E_4	第三方检测机构的意向寻租收益为 E_4
C_6	第三方检测机构意向寻租的成本为 C_6
F_1	政府监管部门严格监管对意向寻租的第三方检测机构的罚款 F_1
R_2	政府监管部门给予拒绝寻租的第三方检测机构的奖励 R_2

根据上述假设条件,构建政府监管部门、生态工程企业、第三方检验机构的三方博弈收益矩阵,如表 2 所示。

表 2 三方博弈的收益矩阵和模型描述

Table 2 Benefit matrix and model description of the three-party game

策略组合 Strategy combination	政府监管部门 Government regulatory department	生态工程企业 Ecological engineering enterprise	第三方检验机构 Third-party inspection agency
(F_1, H_1, K_1)	$E_1 + E_5 - C_1 - R_1 - R_2$	$E_2 + R_1 - C_2$	$E_3 + R_2 - C_8$
(F_1, H_1, K_2)	$E_1 + E_5 + F_1 - C_1 - R_1$	$E_2 + R_1 - C_2$	$E_3 - C_6 - C_8 - F_1$
(F_1, H_2, K_1)	$E_1 + F_2 - C_1 - R_2$	$E_2 - C_3 - C_5 - F_2$	$E_3 + R_2 - C_8$
(F_1, H_2, K_2)	$E_1 + F_1 + F_2 - C_1$	$E_2 - C_3 - C_4 - C_5 - F_2$	$E_3 + E_4 - C_6 - F_1$
(F_2, H_1, K_1)	$E_5 - R_1 - R_2$	$E_2 + R_1 - C_2$	$E_3 + R_2 - C_8$
(F_2, H_1, K_2)	$E_5 - R_1$	$E_2 + R_1 - C_2$	$E_3 - C_6 - C_8$
(F_2, H_2, K_1)	$-F_3 - C_7 - R_2$	$E_2 - C_3 - C_4$	$E_3 + R_2 - C_8$
(F_2, H_2, K_2)	$-F_3 - C_7$	$E_2 - C_3 - C_4 - C_5$	$E_3 + E_4 - C_6 - C_8$

2 三方博弈模型描述

2.1 政府监管部门的策略模型描述

根据前人的相关研究,采用演化博弈的复制动态方程分析方法^[36-37],描述一个特定策略在群体中被采用

的频率,其一般形式表示如下:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i [(u_i, x) - u(x, x)] \quad (1)$$

式中, x_i 是在总体中采用纯策略的比例或概率, (E_{xi}, x) 是采用纯策略时的适应度(期望值), $E(x, x)$ 是平均适应度(平均期望值)。在本文中, E_{ij} 表示第 i 个利益相关者的 j 个策略的预期收益, 其中 $i=m$ 代表政府监管部门, $j=1, 2$ 分别表示第一种和第二种策略。例如, E_{m1} 代表政府监管部门选择“严格监管”策略的进程。

政府监管部门选择严格监管或宽松监管的期望收益($E(x)$ 、 $E(1-x)$)以及分别为:

$$E(x) = y \times z \times (E1 + E5 - C1 - R1 - R2) + (1-y) \times z \times (E1 + F2 - C1 - R2) + y \times (1-z) \times (E1 + E5 + F1 - C1 - R1) + (1-y) \times (1-z) \times (E1 + F1 + F2 - C1) \quad (2)$$

$$E(1-x) = y \times z \times (E5 - R1 - R2) + (1-y) \times z \times (-F3 - C7 - R2) + y \times (1-z) \times (E5 - R1) + (1-y) \times (1-z) \times (-F3 - C7) \quad (3)$$

同时,政府监管部门的平均收益分别用 $\overline{E_m}$ 表示。并且通过以下方式获得平均收益:

$$\begin{aligned} \overline{E_m} &= x E_{m1} + (1-x) E_{m2} \\ \overline{E_m} &= C7 \times x - F3 - C1 \times x - C7 + C7 \times y + E1 \times x + F1 \times x + F2 \times x + F3 \times x + E5 \times y + F3 \times y - R1 \times y - R2 \times z - C7 \times x \times y - \\ &\quad F3 \times x \times y - F1 \times x \times z \end{aligned} \quad (4)$$

令 $F(x) = \frac{dx}{dt}$, 并结合上述收益矩阵, 政府监管部门策略选择的复制动力学方程表示如下:

$$F(x) = x(E_{m1} - \overline{E_m}) = x \times (x-1) \times (C1 - C7 - E1 - F1 - F2 - F3 + C7 \times y + F2 \times y + F3 \times y + F1 \times z) \quad (5)$$

2.2 生态工程企业的策略模型描述

复制动力学实际上是一个动态微分方程,描述了一个特定策略在群体中被采用的频率,其一般形式表示如下:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i [(u_i, x) - u(x, x)] \quad (6)$$

式中, x_i 是在总体中采用纯策略的比例或概率, (u_{xi}, x) 是采用纯策略时的适应度(期望值), $u(x, x)$ 是平均适应度(平均期望值)。在本文中, U_{ij} 表示第 i 个利益相关者的 j 个策略的预期收益, 其中 $i=s$, 代表生态工程企业, $j=1, 2$ 分别表示第一种和第二种策略。例如, U_{s1} 代表生态工程企业选择“高质量生态工程建设”策略的进程。

生态工程企业选择高质量生态工程建设或低质量生态工程建设的期望收益($E(y)$ 、 $E(1-y)$)以及分别为:

$$E(y) = x \times z \times (E2 + R1 - C2) + (1-x) \times z \times (E2 + R1 - C2) + x \times (1-z) \times (E2 + R1 - C2) + (1-x) \times (1-z) \times (E2 + R1 - C2) \quad (7)$$

$$E(1-y) = x \times z \times (E2 - C3 - C5 - F2) + (1-x) \times z \times (E2 - C3 - C4) + x \times (1-z) \times (E2 - C3 - C4 - C5 - F2) + (1-x) \times (1-z) \times (E2 - C3 - C4 - C5) \quad (8)$$

同时,生态工程企业的平均收益分别用 $\overline{U_i}$ 表示。并且通过以下方式获得平均收益:

$$\begin{aligned} \overline{E_i} &= y E_{i1} + (1-y) E_{i2} \\ \overline{E_i} &= E2 - C3 - C4 - C5 - C2 \times y + C3 \times y + C4 \times y + C5 \times y + C5 \times z - F2 \times x + R1 \times y + C4 \times x \times z - C5 \times x \times z - C5 \times y \times z + \\ &\quad F2 \times x \times y - C4 \times x \times y \times z + C5 \times x \times y \times z \end{aligned} \quad (9)$$

令 $F(y) = \frac{dy}{dt}$, 并结合上述收益矩阵, 生态工程企业策略选择的复制动力学方程表示如下:

$$F(y) = y(E_{i1} - \overline{E_i}) = -y \times (y-1) \times (C3 - C2 + C4 + C5 + R1 - C5 \times z + F2 \times x - C4 \times x \times z + C5 \times x \times z) \quad (10)$$

2.3 第三方检测机构的策略模型描述

复制动力学实际上是一个动态微分方程,描述了一个特定策略在群体中被采用的频率,其一般形式表示如下:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i [(u_i, x) - u(x, x)] \quad (11)$$

式中, x_i 是在总体中采用纯策略的比例或概率, (E_{xi}, x) 是采用纯策略时的适应度(期望值), $E(x, x)$ 是平均适应度(平均期望值)。在本文中, E_{ij} 表示第 i 个利益相关者的 j 个策略的预期收益, 其中 $i=l$, 代表第三方检验机构, $j=1, 2$ 分别表示第一种和第二种策略。例如, E_{g1} 代表第三方检验机构选择“拒绝寻租”策略的进程。

第三方检验机构选择拒绝寻租或意向寻租的期望收益($E(z)$ 、 $E(1-z)$)以及分别为:

$$E(z) = x \times y \times (E3 + R2 - C8) + x \times (1-y) \times (E3 + R2 - C8) + (1-x) \times y \times (E3 + R2 - C8) + (1-x) \times (1-y) \times (E3 + R2 - C8) \quad (12)$$

$$E(1-z) = x \times y \times (E3 - C6 - C8 - F1) + x \times (1-y) \times (E3 + E4 - C6 - F1) + (1-x) \times y \times (E3 - C6 - C8) + (1-x) \times (1-y) \times (E3 + E4 - C6 - C8) \quad (13)$$

同时, 第三方检验机构的平均收益分别用 $\bar{E}_g$ 表示。并且通过以下方式获得平均收益:

$$\bar{E}_g = z E_{g1} + (1-z) E_{g2}$$

$$\bar{E}_g = E3 - C8 - C6 + E4 + C8 \times x + C6 \times z - F1 \times x - E4 \times y - E4 \times z + R2 \times z - C8 \times x \times y - C8 \times x \times z + F1 \times x \times z + E4 \times y \times z + C8 \times x \times y \times z \quad (14)$$

令 $F(z) = \frac{dz}{dt}$, 并结合上述收益矩阵, 第三方检验机构策略选择的复制动力学方程表示如下:

$$F(z) = z(E_{g1} - \bar{E}_g) = -z \times (z-1) \times (C6 - E4 + R2 - C8 \times x + F1 \times x + E4 \times y + C8 \times x \times y) \quad (15)$$

3 三方博弈模型稳定性分析

参与主体根据既得利益不断调整策略以追求自身利益的改善, 最终达到动态平衡的策略称为演化稳定策略(ESS)^[38]。在判定演化稳定策略之前首先要求出演化博弈的均衡点, 令 $F(x) = 0$ 、 $F(y) = 0$ 和 $F(z) = 0$, 即系统策略选择的变化率为零时, 可以得到该动力系统的 8 个均衡点, 根据雅可比矩阵的特征值分析法, 对演化系统存在的 8 个纯策略均衡点进行稳定性分析。若均衡点所有的特征值都小于 0, 则该均衡点为系统演化稳定策略(ESS); 若至少有一个特征值大于 0, 则为不稳定点。表 3 为 8 个纯策略均衡点的稳定性结果。

首先, $F(x)$ 、 $F(y)$ 、 $F(z)$ 分别对 x 、 y 和 z 求导, 得到雅可比矩阵 J ;

雅可比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_3 \\ J_4 & J_5 & J_6 \\ J_7 & J_8 & J_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其特征值表达式如下:

$$V_x = (2 \times x - 1) \times (C1 - C7 - E1 - F1 - F2 - F3 + C7 \times y + F2 \times y + F3 \times y + F1 \times z) \quad (17)$$

$$V_y = -(2 \times y - 1) \times (C3 - C2 + C4 + C5 + R1 - C5 \times z + F2 \times x - C4 \times x \times z + C5 \times x \times z) \quad (18)$$

$$V_z = -(2 \times z - 1) \times (C6 - E4 + R2 - C8 \times x + F1 \times x + E4 \times y + C8 \times x \times y) \quad (19)$$

根据上述参数假设, 结合课题组在黄土高原, 黄河流域和“三北”工程等地区对生态工程质量监管, 生态工程验收和验收完成之后建设成效调研情况分析, 在不同参数设置和 ESS 判断标准下, 得出三方博弈主体的

演化博弈模型存在 3 个 ESS: $E_2(0,0,1)$ 、 $E_6(1,0,1)$ 和 $E_8(1,1,1)$ 。

表 3 雅可比矩阵 J 的特征根
Table 3 Characteristic roots of Jacobian matrix J

均衡点 Equilibrium point	特征根 1 Eigenroot 1	特征根 2 Eigenroot 2	特征根 3 Eigenroot 3	ESS
$E_1(0,0,0)$	$C7-C1+E1+F1+F2+F3$	$C3-C2+C4+C5+R1$	$C6-E4+R2$	—
$E_2(0,0,1)$	$C7-C1+E1+F2+F3$	$C3-C2+C4+R1$	$E4-C6-R2$	√
$E_3(0,1,0)$	$E1-C1+F1$	$C2-C3-C4-C5-R1$	$C6+R2$	—
$E_4(0,1,1)$	$E1-C1$	$C2-C3-C4-R1$	$-C6-R2$	—
$E_5(1,0,0)$	$C1-C7-E1-F1-F2-F3$	$C3-C2+C4+C5+F2+R1$	$C6-C8-E4+F1+R2$	—
$E_6(1,0,1)$	$C1-C7-E1-F2-F3$	$C3-C2+C5+F2+R1$	$C8-C6+E4-F1-R2$	√
$E_7(1,1,0)$	$C1-E1-F1$	$C2-C3-C4-C5-F2-R1$	$C6+F1+R2$	—
$E_8(1,1,1)$	$C1-E1$	$C2-C3-C5-F2-R1$	$-C6-F1-R2$	√

情景 1:当 $C7 < C1+E1+F2+F3$ 时,复制动态系统存在一个稳定点 $E_2(0,0,1)$ 。说明该地区生态区位重要性不明显,各参与方对生态工程建设,生态工程质量和生态工程成效的关注较低,生态工程质量监管动力不足。此时政府监管部门采取宽松监管的成本低收益高;生态工程企业低质量工程建设时,支出的成本和面临的罚款低于政府监管部门严格监督付出的成本与获得的奖励;第三方检测机构获得政府监管部门给予的奖励,低于采取意向寻租策略的成本与收益时,才能促进三方博弈系统出现稳定策略组合。

情景 2:当 $C1 < -C7+E1+F2+F3$ 时,复制动态系统存在一个稳定点 $E_6(1,0,1)$ 。说明该地区生态区位重要性明显,生态工程建设,生态工程质量和生态工程成效受到政府监管部门高度关注,以及第三方检测机构严格的检测认证。政府监管部门采取严格监管策略的成本低收益高;生态工程企业采取低质量生态工程建设的成本低和收益高,采取高质量生态工程建设成本高利润低,生态工程企业的寻租成本低收益高,政府监管部门的罚款数额低;第三方检测机构拒绝寻租获得政府监管部门的奖励高于其采取意向寻租策略的成本与收益时,才能有效促进三方博弈系统出现稳定策略组合。

情景 3:当 $C1 < E1$ 时,复制动态系统仅存在一个稳定点 $E_8(1,1,1)$ 。说明该地区生态区位战略性意义重大,在生态工程建设,生态工程质量检测认证和生态工程项目验收等方面受到政府监管部门高度关注,生态工程企业在高质量生态工程建设以及第三方检测机构严格的检测认证。政府监管部门采取严格监管策略的成本低收益高,社会公信力与社会效益提升;生态工程企业采取高质量生态工程建设策略时成本低,收益和奖励高,企业社会地位名气提升;第三方检测机构,采取拒绝寻租策略时工程质量检测的成本和收益高于意向寻租成本与收益,同时得到政府监管部门的奖励,有效促进三方博弈系统出现稳定策略组合。

4 三方演化博弈仿真分析

4.1 三方演化博弈路径演化模拟

为了验证三方演化博弈稳定性的有效性,结合生态工程质量监管各参与方在执行过程中的现实情况,对三方演化博弈仿真和敏感性分析进行赋值,利用 Matlab2023a 进行仿真分析。为满足情景 1(E_2)、情景 2(E_6)和情景 3(E_8)的条件,本研究在表 4 中分别设置了满足三种情景的参数,分析博弈主体在采取不同行为决策时,相关参数对生态工程质量监管三方主体演化策略选择过程 and 结果的影响。

表 4 情景参数设置
Table 4 Scenario parameter settings

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	E1	E4	R1	R2	F1	F2	F3
情景 1 Situation 1	90	80	30	20		30	20		10	40	20	20		10	10
情景 2 Situation 2	20	90	30		10	20	50	30	30	20	20	20	40		
情景 3 Situation 3	20	60	40		10	20			40		20	30	40	20	

情景 1: $E_2(0,0,1)$

图 2 展示了情景 1 中政府监管部门、生态工程企业、第三方检测机构的演进路径。

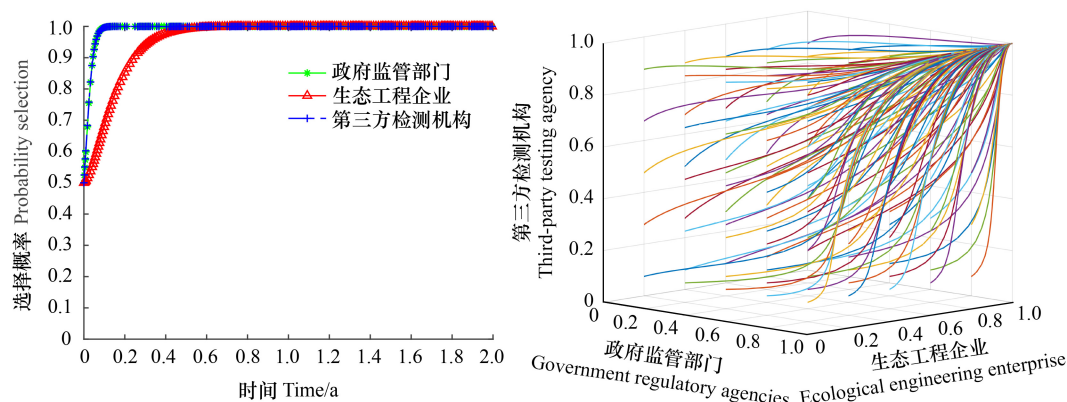


图 2 均衡点 $E_2(0,0,1)$ 路径演化图

Fig.2 Path evolution diagram of equilibrium point $E_2(0,0,1)$

情景 2: $E_6(1,0,1)$

图 3 展示了情景 2 中政府监管部门、生态工程企业、第三方检测机构的演进路径。

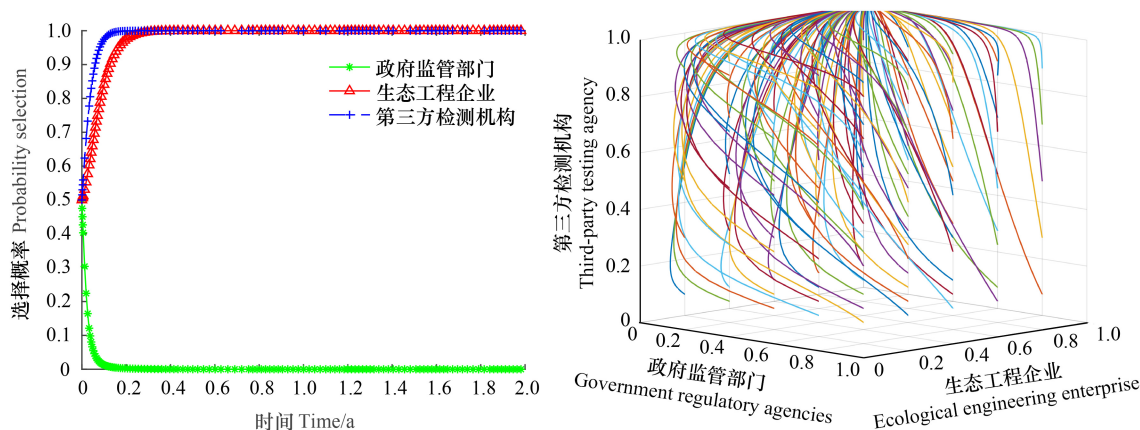


图 3 均衡点 $E_6(1,0,1)$ 路径演化图

Fig.3 Path evolution diagram of equilibrium point $E_6(1,0,1)$

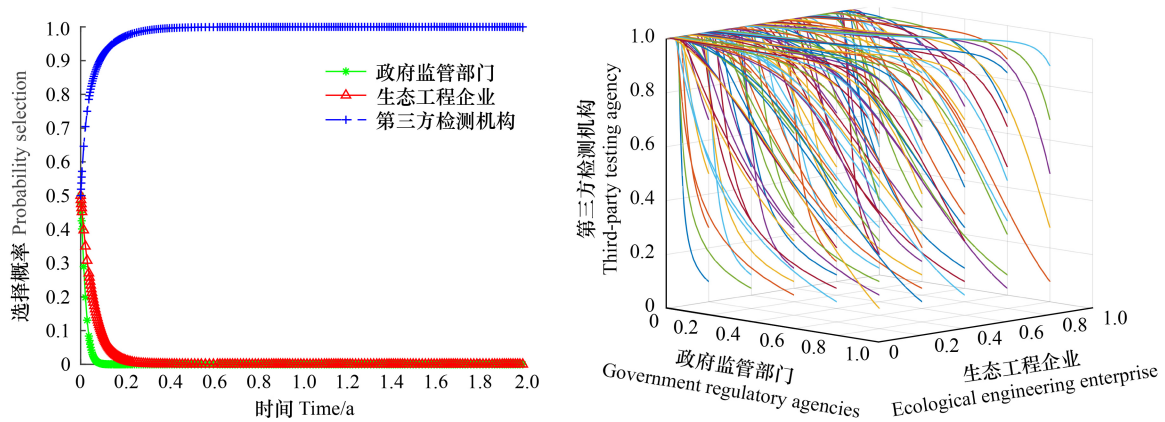
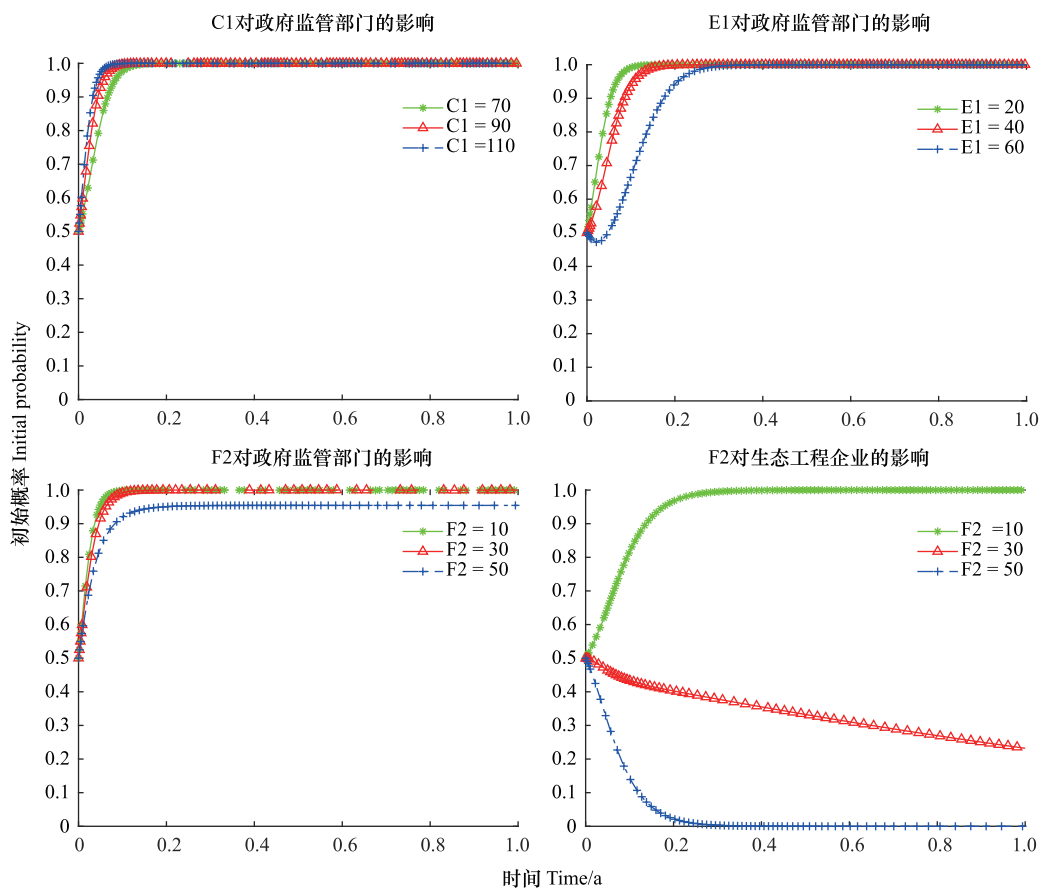
情景 3: $E_8(1,1,1)$

图 4 展示了情景 3 中政府监管部门、生态工程企业、第三方检测机构的演进路径。

4.2 三方演化博弈敏感性分析

4.2.1 情景 1 (E_2) 敏感性分析

如图 5 与图 6 所示,当博弈主体执行 $E_2(0,0,1)$ 策略时, $C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, E_1$ 和 F_2 的参数变化对博弈主体采取的不同行为决策产生影响。在情景 1 稳定点 $E_2(0,0,1)$ 中,博弈主体选择不同策略选择付出的成本,期望收益、政府监管部门的奖励措施和惩罚机制对相关主体带来的效益变化,是影响博弈主体行为决策的主要因素。因此,为保障博弈主体三方在情景 1 中达到理想的运行状态,保障生态工程建设的实施,则政府监管部门应该降低宽松监管的成本,增加宽松监管收益;生态工程企业选择低质量生态工程建设的成本低于高质量生态工程建设的成本,生态工程企业选择低质量生态工程建设策略的收益高于被政府监管部门的罚款数额;第三方检测机构选择拒绝寻租策略的成本与政府监管部门的奖励收益,高于生态工程企业意向寻租时第

图4 均衡点 $E_8(1,1,1)$ 路径演化图Fig.4 Path evolution diagram of equilibrium point $E_8(1,1,1)$ 图5 均衡点 E_2 相关参数与主体策略变化Fig.5 Changes in parameters related to equilibrium point E_2 and main strategies

三方检测机构获得的收益。

4.2.2 情景 2 (E_6) 敏感性分析

如图 7 与图 8 所示,当博弈主体执行 $E_6(1,0,1)$ 策略时, $C_1, C_2, C_3, C_5, C_6, R_2, E_4$ 和 R_1 的参数变化对博弈主体采取的不同行为决策产生影响。在情景 2 稳定点 $E_6(1,0,1)$ 中,博弈主体选择不同策略付出的成本,期望收益、政府监管部门的奖励机制变化对相关主体带来的效益变化,是影响博弈主体行为决策的主要因素。

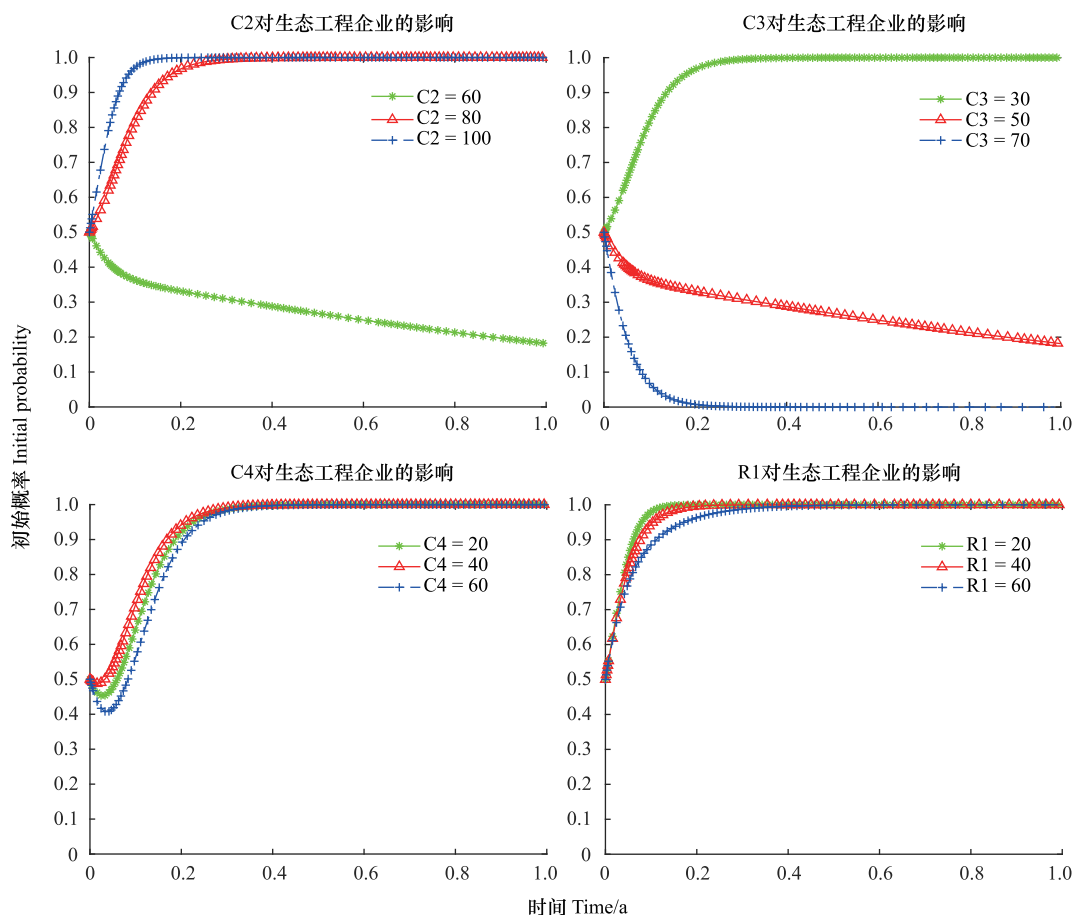


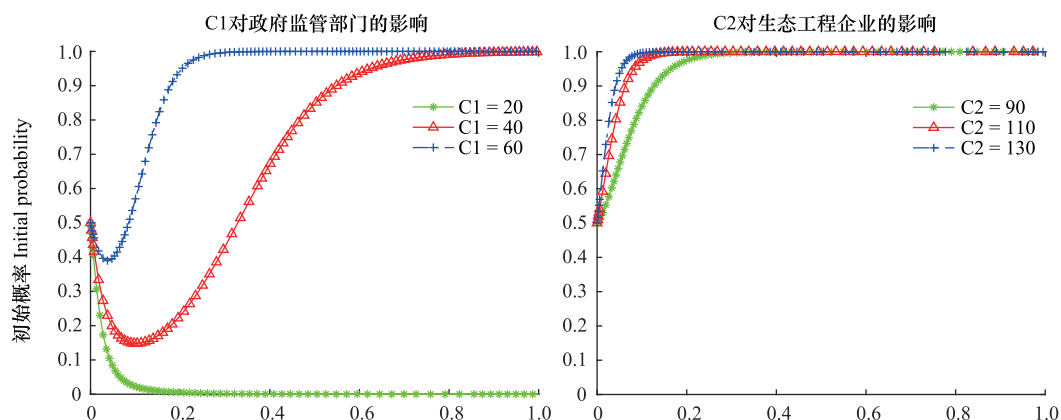
图6 均衡点 E2 相关参数与主体策略变化

Fig.6 Changes in relevant parameters and main strategies of equilibrium point E2

因此,为保障博弈主体三方在情景2的状态下达到理想运行状态,以及生态工程建设的实施,则政府监管部门在执行严格监管策略时,采取适当的奖励机制以及注重自身的降本增效;生态工程企业选择低质量生态工程建设策略的收益高于生态工程企业被政府监管部门的罚款数额;第三方检测机构选择拒绝寻租策略的收益与成本,与政府监管部门的奖励收益,高于生态工程企业意向寻租行为对第三方检测机构获得的收益。

4.2.3 情景3 (E_8) 敏感性分析

如图9所示,当博弈主体执行 $E_8(1,1,1)$ 策略时, $C2, C3, C5$ 和 $R1$ 的参数变化对博弈主体采取的不同行为决策产生影响。在情景3稳定点 $E_8(1,1,1)$ 中,博弈主体中的生态工程企业的不同策略选择,与政府监管



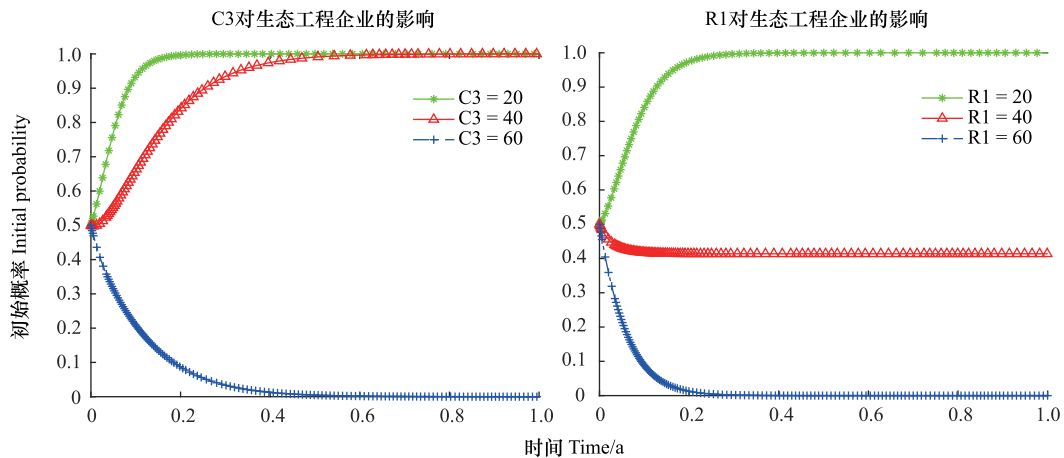


图7 均衡点 E6 相关参数与主体策略变化

Fig.7 Changes in relevant parameters and main strategies of equilibrium point E6

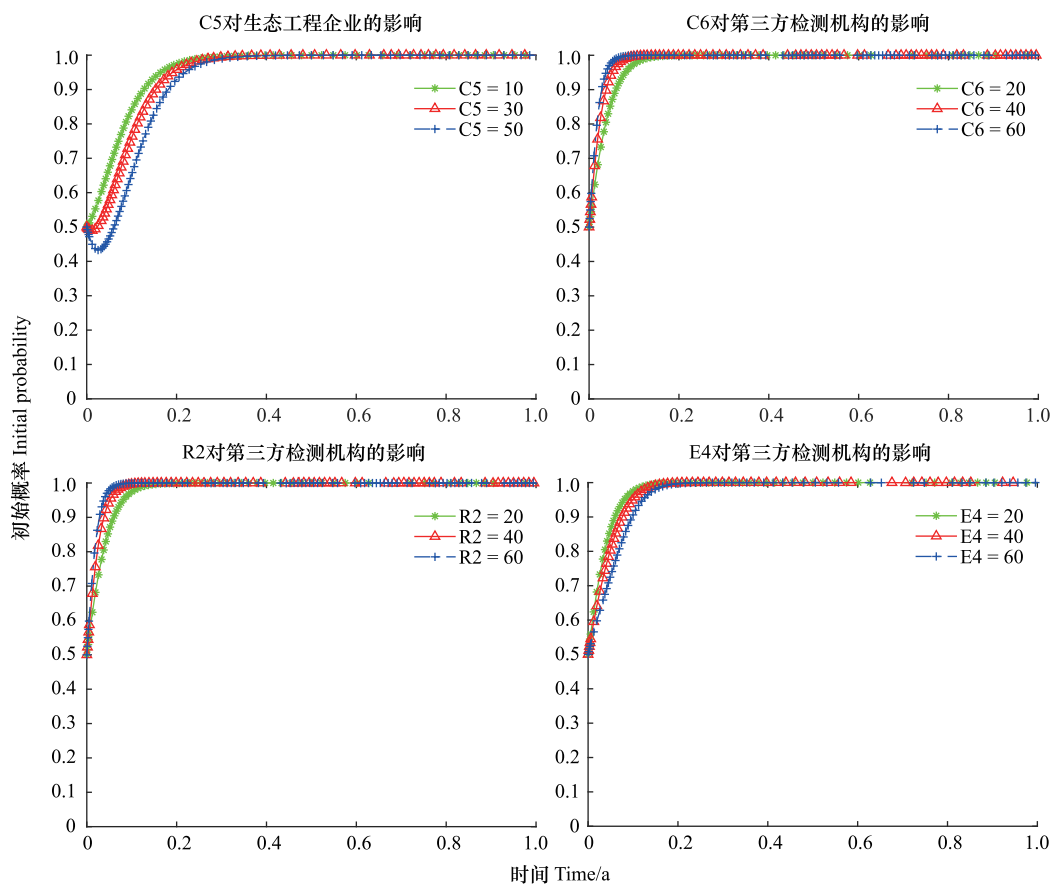


图8 均衡点 E6 相关参数与主体策略变化

Fig.8 Changes in relevant parameters and main strategies of equilibrium point E6

部门的奖励机制关系变化是影响博弈行为决策的主要因素。因此,为保障博弈主体三方在情景3的状态下达到理想运行状态。政府监管部门在执行严格监管策略时,应该科学论证现行的奖励机制的可行性;生态工程企业选择高质量生态工程策略,提高经济收益与社会效益;第三方检测机构趋向于选择拒绝寻租策略,依法依规出具生态工程质量检测报告,保障国家生态工程建设质量安全。

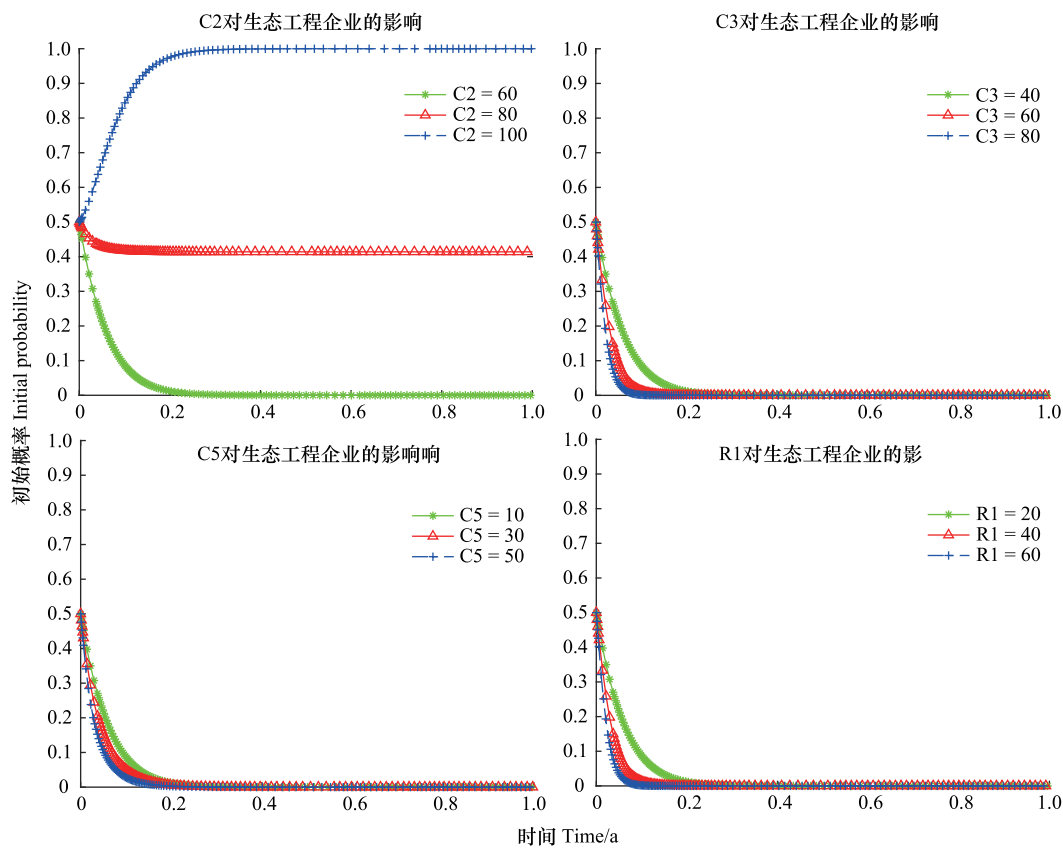


图9 均衡点 E8 相关参数与主体策略变化

Fig.9 Changes in relevant parameters and main strategies of equilibrium point E8

5 结论与政策建议

针对生态工程质量监管机制的三方演化博弈问题,本文通过构建政府监管部门、生态工程企业和第三方检测机构的三方非对称动态演化博弈模型,分析了各方策略选择的稳定性、博弈主体系统均衡策略组合稳定性以及各要素的影响关系,并通过仿真分析验证了分析结论的有效性与科学性。

5.1 结论

(1)在重大生态工程大规模长时序实施的背景下,厘清生态工程质量监管主体的决策机制,确保生态工程质量监管机制满足参与约束与奖惩相容。由于各参与方的行为策略变化受其他参与方策略选择变化的影响较大,必须综合考虑生态工程监管各参与主体的效益最大化与综合效益最大化的问题,促进行业可持续健康发展。

(2)奖惩机制对各参与方形成内生性集体行动,对生态工程质量监管具有积极催化作用。强化奖惩决策机制,明确奖惩内容,制定奖惩办法,细化奖惩标准,严格执行生态工程质量监管条例,有效压实三方主体责任,推动生态工程高质量落实落地,保障生态工程建设实施满足预期目标,促进生态效益提升。

(3)生态工程质量监管三方主体的策略选择受多因素耦合驱动,期望收益与付出成本是决定三方主体行为决策的关键性经济因素,政府监管部门侧重将生态效益,社会效益与管理风险管控放在优先位置,生态工程企业和第三方检测机构通常将自身经济利益放在优先位置。

(4)生态工程实施区位生态战略价值与意义的重要程度以及紧迫性,对三方主体在生态工程质量监管,生态工程质量保障、生态工程质量考核等方面的策略选择具有重要的影响。

5.2 政策建议

生态工程类型繁多,就本研究中的各参与方行为决策影响而言,闭环高质量生态工程质量监管制度体系的关键在于完善各参与方的考核制度与奖惩机制,以及相关法律法规的制定。

第一,生态工程奖惩机制的制定,要充分考虑各参与方的利益诉求,严格遵循生态工程质量监管运行的客观规律与行业标准。对于政府监管部门要坚持生态性、社会性导向原则,重在采用非物质奖惩机制引导生态工程企业和第三方检测机构严格遵循生态工程质量标准。

第二,生态工程绩效考核制度要勇于打破各参与方内部考核机制,提升各参与方考核办法的客观性和公正性,将人民群众的满意度和幸福感纳入生态工程成效考核体系,积极探索“飞地”考核与第三方机构独立考核模式。

第三,要坚持生态工程的生态性、公益性和可持续性导向原则。坚持贯彻落实“两山”理论,形成政府监管部门严格监督、生态工程企业建设高质量生态工程、第三方检测机构依法依规出具生态工程质量检测报告的行业健康发展循环。

第四,完善生态工程质量监管法律法规,制约各参与方的行为决策,规范生态工程市场环境。通过加大执法力度,加大对违法行为的惩处力度,形成有效的威慑作用,促进市场公平,建立健全市场准入机制,加强市场监管,营造公平、公正的市场环境。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] Bodansky D. The united nations framework convention on climate change: a commentary. *Yale Journal of International Law*, 1965, 18: 2.
- [3] Aronson J, Goodwin N, Orlando L, Eisenberg C, Cross A T. A world of possibilities: six restoration strategies to support the United Nation's Decade on Ecosystem Restoration. *Restoration Ecology*, 2020, 28(4): 730-736.
- [4] Dudley N, Gonzalez E, Hallett J G, Keenleyside K, Mumba M. The UN decade on ecosystem restoration (2021—2030): what can protected areas contribute? *Parks*, 2020(26.1): 111-116.
- [5] Marshall G R, Lobry de Bruyn L A. Water policy reform for sustainable development in the Murray-darling basin, Australia: insights from resilience thinking//Water Resilience. Cham: Springer International Publishing, 2020: 65-89.
- [6] 李世东. 世界重点生态工程——韩国治山绿化计划. *国土绿化*, 2022(11): 67-69.
- [7] Darier É. Environmental governmentality: The case of Canada's green plan. *Environmental Politics*, 1996, 5(4): 585-606.
- [8] Dronin N. Stephen brain, song of the forest: Russian forestry and stalinist environmentalism, 1905-1953. *The Soviet and Post-Soviet Review*, 2013, 39: 280-282.
- [9] Brismar A. River systems as providers of goods and services: a basis for comparing desired and undesired effects of large dam projects. *Environmental Management*, 2002, 29(5): 598-609.
- [10] 姚文艺, 焦鹏. 黄河流域水土保持综合治理空间均衡性分析. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 1-7, 22.
- [11] 纪平, 邵全琴, 王敏, 刘华, 王晓慧, 凌成星, 侯瑞霞. 中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价. *林业科学*, 2022, 58(11): 31-48.
- [12] 李哈哈, 黄颖利, 张祥华. 基于 DEA-Malmquist 模型的中国省际生态效率时空分异研究——基于天然林保护工程. *数学的实践与认识*, 2021, 51(11): 290-299.
- [13] 段绪萌, 韩美, 孔祥伦, 孙金欣. 退耕还林(草)工程前后黄河流域生态系统碳储量时空演变与模拟预测. *环境科学*, 2024, 45(10): 5943-5956.
- [14] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 樊江文, 徐新良, 王军邦. 2005—2009 年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. *地理研究*, 2013, 32(9): 1645-1656.
- [15] 西藏生态安全屏障保护与建设成效监测与评估创新. *中国科学院院刊*, 2018, 33(9): 987-989.
- [16] 习近平. 坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理. *资源导刊*, 2022, (12): 4.
- [17] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 刘国波, 杨帆, 张雄一, 牛丽楠, 黄海波, 樊江文, 刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估. *地理学报*, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [18] 王夏晖, 王波, 柴慧霞, 牟雪洁, 朱振肖, 张丽荣. 探索新时期科学实施生态工程有效路径筑牢人与自然和谐共生的美丽中国基石. *环境*

- 保护, 2023, 51(24): 45-49.
- [19] Xia J Y, Ren D, Wang X H, Xu B, Zhong X Y, Fan Y J. Ecosystem quality assessment and ecological restoration in fragile zone of Loess Plateau: a case study of Suide county, China. *Land*, 2023, 12(6): 1131.
- [20] 张毅茜, 冯晓明, 王晓峰, 傅伯杰, 周潮伟. 重点脆弱生态区生态恢复的综合效益评估. *生态学报*, 2019, 39(20): 7367-7381.
- [21] Gong X W, Li Y Q, Wang X Y, Zhang Z S, Lian J, Ma L, Chen Y, Li M Y, Si H T, Cao W J. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on vegetation degradation and restoration in typical ecologically fragile areas of China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109536.
- [22] 王岚, 曹巍, 黄麟. 中国重大生态工程近 40 年生态成效整合分析. *生态学报*, 2024, 44(7): 2673-2687.
- [23] 张朝辉. 干旱区农田林网生态工程的稳定性评价研究——基于新疆 Y 县的考察. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(3): 107-112.
- [24] 刘玉佳, 彭建, 李刚勇, 韩万强, 刘亮, 关靖云, 巨喜峰, 郑江华. 基于 GEE 的库鲁斯台草原生态环境评价. *生态学杂志*, 2023, 42(11): 2776-2785.
- [25] 魏轩, 周立华, 韩张雄, 王娅, 陈勇, 杨国靖. 生态脆弱区生态工程效益评价的比较研究. *生态学报*, 2020, 40(1): 377-383.
- [26] 蒋钢, 李靖. 关于水保治沟骨干工程市场监督管理工作的建议. *中国水土保持*, 2005(12): 46-48.
- [27] 张文义, 马生祥, 田永宏, 马竹娥. 韭园沟示范区水保生态工程质量监督的做法. *中国水土保持*, 2005(9): 23-25.
- [28] 李宸宇, 朱建华, 郭学媛, 李奇, 张倩如, 刘华妍, 肖文发. 长江经济带林业生态工程区生境质量时空变化. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3788-3799.
- [29] 靳琳琳, 赵哲耘, 刘莉, 闫俊周. 社会化媒体驱动产品质量多方协同监管的博弈策略. *中国软科学*, 2024(2): 167-177.
- [30] 周宏, 高鹏超. 基于三方演化博弈的网红营销问题协同治理策略. *中国软科学*, 2023(S1): 100-111.
- [31] 孙勇, 杨瑞佳, 张亚峰. 数字平台“二选一”垄断行为与监管策略. *运筹与管理*, 2024, 33(1): 219-225.
- [32] Cao Y, Yuan Y B, Zhou H, Yuan X H. Facilitating cooperation among users in water conflicts with a tripartite evolutionary game model: a case study in the Hanjiang Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129439.
- [33] Xu Z Q, Cheng Y K, Yao S L. Tripartite evolutionary game model for public health emergencies. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 2021: 6693597.
- [34] 张攀, 郭圣煜. 基于进化博弈理论的建筑工程质量监管 SD 模型. *土木工程与管理学报*, 2018, 35(6): 178-185, 207.
- [35] 沈志锋, 王鹏, 郭士干, 冯军. 基于建构扎根理论的中国 EPC 工程质量监管机制研究. *土木工程学报*, 2021, 54(9): 115-128.
- [36] Galor O, Weil D N. Population, technology, and growth: from Malthusian stagnation to the demographic transition and beyond. *American Economic Review*, 2000, 90(4): 806-828.
- [37] Du Y W, Sun H R, Wan X L. Tripartite supervision mechanism and evolutionary strategies for marine ranching ecological security: Policy tools perspective. *Regional Studies in Marine Science*, 2022, 50: 102125.
- [38] Zhang M H, Zhang Q, Zhou D Q, Wang L. Punishment or reward? Strategies of stakeholders in the quality of photovoltaic plants based on evolutionary game analysis in China. *Energy*, 2021, 220: 119754.