

长江大保护工程建设主体策略选择演化博弈研究

王仁超¹, 陈宏运¹, 毛三军², 彭相国²

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 长江三峡技术经济发展有限公司, 北京 101100)

摘要: 长江大保护工程建设与城市运行交织, 企业、政府、社会三方利益关系复杂, 已有的主体策略选择研究未考虑社会方对工程建设的影响, 难以准确反映各方的协同关系, 针对此问题, 以演化博弈理论及复制动态方法为基础, 构建了三方演化博弈模型, 并结合仿真计算分析了协同成本和协同效应对策略选择的影响。结果表明: 企业、政府、社会三方的策略选择具有趋同性, 只有各方策略保持一致时, 才能保持稳定; 三方的策略选择受协同成本和协同效应的影响, 协同成本越低、协同效应越强, 则两种策略下的利益差越大, 系统越容易演化为选择积极策略; 企业和政府对社会的协同效应增加时, 会缩小企业、政府各自不同策略选择的利益差, 使两者收敛速度有所减慢。

关键词: 演化博弈; 策略选择; 仿真分析; 长江大保护工程

中图分类号: TV51

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0110-11

Strategy selection of stakeholders in the Yangtze River Protection Project construction based on evolutionary game theory

WANG Renchao¹, CHEN Hongyun¹, MAO Sanjun², PENG Xiangguo²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Yangtze Three Gorges Technology and Economy Development Co., Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: In the development of Yangtze River Protection Project, project construction and urban operation are intertwined, so are the interest parties of the enterprise, government and society. The existing strategy selection researches can hardly reflect the synergetic relationship of all parties accurately, because the impact of the society on the construction is overlooked. Aiming at this problem, based on the evolutionary game theory and replication dynamic method, an evolutionary game model of the enterprise, government and society is constructed, and the influence of the synergetic cost and synergetic effect on the synergetic strategy selection is analyzed combined with the simulation calculation. The results show that the strategic choices of the enterprise, government and society are relevant, and only when the synergetic strategies of all parties are consistent can they remain stable; the choice of synergetic strategies of the three parties is affected by the synergetic cost and synergetic effect, the lower the synergetic cost and the stronger the synergetic effect, the greater the benefit difference between two strategies, and the easier it is for the system to evolve into a positive strategy; the increase of the synergetic effect of the enterprise and government on the society will lead to the decrease of the benefit difference of different strategic choices of the enterprise and government, which in turn will slow down the convergence speed.

Key words: evolutionary game; strategy selection; simulation analysis; the Yangtze River Protection Project

1 研究背景

长江是中国的母亲河,也是中华民族发展的重要支撑^[1],在习近平总书记“共抓大保护,不搞大开发”^[2]的重要指示下,长江沿岸开展了一系列以改

善长江生态环境为目标的长江大保护工程,这些工程多采用 PPP(public-private partnership)项目运作模式以及 EPC(engineering procurement construction)建设模式,且工程建设与城市功能运行交织,存在较大的相互干扰,社会方也成为能够直接影响工程建

收稿日期:2022-05-16; 修回日期:2022-10-13

作者简介:王仁超(1963-),男,山东烟台人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水利工程管理仿真。

通讯作者:陈宏运(1997-),男,天津人,硕士研究生,研究方向为工程建设协同管控。

设的利益相关者,使得项目利益相关者之间的关系更加复杂,如受到信息交互不及时、建设环境负涨落等不良因素的影响,项目利益相关者之间易发生协同度降低的情况,引发进度滞后、成本超支、安全质量失控等问题^[3]。利益是各方关注的首要问题^[4],各利益相关者都是以自身利益最大化来进行工程建设相关活动的^[5],因此,研究利益要素影响下利益相关者的策略选择,对促进各方协同合作,优化项目组织管理,提高项目管控水平具有借鉴意义。

已有长江大保护工程相关研究主要集中在长江经济带高质量发展、绿色发展、生态文明建设等方面^[6],从顶层设计^[2]、技术支持^[7]、实施方案^[8]等方面进行了研究与实践,但对于如何提高工程建设管控水平,尚缺少相关研究。

演化博弈理论具有有限理性^[9]、动态演化性的特点,能够反映博弈局势的动态变化^[10],可通过常微分方程来描述策略的演化,能够对利益要素驱动下各利益相关者策略选择提供理论支撑。已有策略选择演化博弈研究主要包括策略选择影响因素分析、进化稳定策略分析、协同工作机制改进 3 个方面。在策略选择影响因素分析方面,曲娜^[11]针对工程建设阶段,以业主和承包商为利益相关者,提出利益分配为决定工程建设参与方协同程度的关键因素;Liu 等^[12]对企业参与可持续能源的行为及策略进行了分析,总结出基本收益、社会环境效益、补贴、合作激励等影响企业策略选择的关键因素;钟云等^[13]以 PPP 项目利益相关者为研究对象,提出外部环境变化、利益分配、信任水平等影响策略选择的关键因素。在进化稳定策略分析方面,Yuan 等^[14]针对预制住宅建筑产业,拟定政府、开发商、购房者为利益相关者,提出三者初始阶段、发展阶段、成熟期 3 个阶段的演化决策行为和稳定策略,通过数值模拟对结果进行了验证;梁秀峰等^[15]针对 PPP 项目绩效支付机制中的不稳定均衡策略,引入动态绩效支付将其优化为稳定均衡策略,并结合数值仿真验证了策略的稳定性;贾斯佳^[16]对 PPP 项目的收益要素及利益相关者之间的博弈关系进行了分析,并基于 AnyLogic 系统动力学模型,构建了某轨道交通项目的仿真模型,结合多种参数设置进行了仿真分析。在协同工作机制改进研究方面,Liu 等^[17]针对集成项目交付模式,提出积极监督管理、建立组织协调团队、推广 BIM 平台、建立奖惩机制、完善利益分配机制等改进措施;Wang 等^[18]分析了清洁能源建设推广工作的进化稳定策略,并提出加强政府监管、引入

激励机制、加强技术推广等协同调整措施;徐一元^[19]阐述了 PPP 项目各利益相关者的多层次利益结构,并提出利益协调机制、特许经营机制、各方自我管理机制 3 类改进机制。

上述对策略选择演化博弈 3 个方面的研究与应用针对的对象主要为企业和政府,涉及的工程类型主要为能源、轨道交通、供应链等,这些工程建设环境相对稳定,与城市运行之间的干扰较小。然而,在长江大保护工程建设过程中,工程建设与城市功能运行交织,与社会主体的生产及工作存在较强的时空干扰,针对此种情况尚缺少研究成果,仅依靠已有成果难以对各利益相关者之间的协同关系进行准确的把控。为此,本文以企业、政府和社会为研究对象,通过设置该 3 个利益相关者之间的协同效应,来表示相互之间的促进与干扰作用,探讨其在长江大保护工程建设过程中的协同行为及进化稳定策略,分析协同成本、协同效应对利益相关者策略选择的影响,为相关应用与研究提供参考。

2 模型假设与构建

如图 1 所示,长江大保护工程建设系统包括 3 个利益相关者,分别为企业、政府和社会。其中企业是项目建设的执行主体,包括项目公司、设计单位、施工单位、供应商 4 个主体,其利益主要为经济利益,也包括社会声誉等间接利益;政府主要负责协调工程建设与原有城市功能运行之间的干扰,并对工程建设进行监管,其利益主要为项目建设所带来的社会经济效益;社会主体包括受工程建设影响的行为主体,包括居民、企业等,其日常工作和生活受到工程建设的影响,也会给工程建设带来一定的限制。

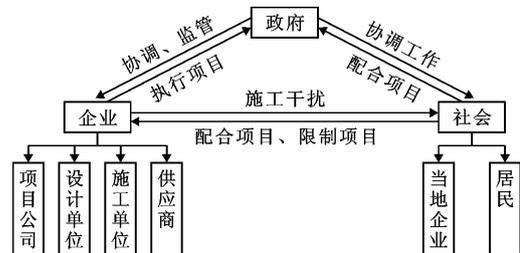


图 1 长江大保护工程建设系统组织结构

2.1 模型假设

长江大保护工程建设系统为多级组织,项目环境复杂,涉及多个层级的众多利益相关者,他们往往依照最小努力原则,以实现自身利益最大化为目标进行项目相关活动^[20],且彼此之间的活动及利益具有普遍的联系。根据宜昌二期工程调研结果及演化

博弈理论成果^[10,11,14-16],做出如下假设:

(1)综合利益假设:假设利益包括直接利益和间接利益两部分,模型中的利益为综合利益,是直接利益与间接利益的总和。直接利益指的是能够被利益相关者直接获得并立即显现其价值的利益,包括安全、质量、进度、成本、文明施工等方面的管控效果以及对受工程建设影响的居民和当地企业所给予的补偿等;间接利益是指被利益相关者获得后,在后续工作中才能显现其价值的利益,包括良好的合作关系、工作能力的提升、社会声誉等。

(2)协同效应假设:假设企业、政府两个工程建设主体具有正向协同效应,协同效应大于0,且当自身协同策略为被动消极策略时,对方对自身的协同效应会有所折减,并假设该折减系数为恒定值。假设社会对企业、政府的协同效应为负面效应,即社会方对工程建设具有干扰作用,并且该负面效应会因为被作用方的消极策略选择而放大,此时协同效应取折减系数的倒数。

(3)协同成本假设:假设当企业、政府采取积极的策略时,需要额外投入资源,存在协同成本。社会方会受到工程建设活动的不良影响,计为协同成本,当选择积极配合项目工作时,社会方受到的不良影响较大;当选择不积极配合项目工作时,社会方受到的不良影响较小。

(4)有限理性假设:假设各利益相关主体为有限理性,将以各自利益最大化为目标进行活动。

2.2 模型建立

模型变量及参数如表1所示。企业有两种策略可供选择,一是积极与政府和社会协同项目工作,企业需要投入一定的资源,使系统整体协同程度得到提高,以提高系统整体利益,二是不与政府和社会积极协同项目工作,企业不再额外投入资源,企业的协同效应较低;政府可选择主动推进项目相关工作和被动执行项目相关工作两种策略;社会可选择积极配合项目工作和不积极配合项目工作两种策略。形成的策略组合如表2所示,相应的利益计算方法如表3所示。

表1 长江大保护工程演化博弈模型变量及参数

符号	含义	符号	含义
E_c	企业积极协同项目工作的收益	C_c	企业积极协同的成本
E'_c	企业不积极协同项目工作的收益	C_g	政府积极协同的成本
E_g	政府主动推进项目相关工作的收益	C_p	社会积极配合项目受到的损失
E'_g	政府被动执行项目相关工作的收益	C'_p	社会不积极配合项目受到的损失
E_p	社会方积极配合工作获得的收益	S_{ij}	i 选择积极策略时对 j 的协同效应
E'_p	社会方不积极配合工作获得的收益	S'_{ij}	i 选择消极策略时对 j 的协同效应
x	企业积极协同项目工作的概率	α	企业不积极协同导致的协同效应折减系数
y	政府主动推进项目工作的概率	β	政府被动执行导致的协同效应折减系数
z	社会积极配合项目工作的概率	γ	社会不积极配合导致的负面影响系数

表2 长江大保护工程演化博弈模型策略选择组合

组合编号	企业	政府	社会
1	积极协同项目工作	积极推进项目工作	积极配合项目工作
2	积极协同项目工作	积极推进项目工作	不积极配合项目工作
3	积极协同项目工作	被动执行项目工作	积极配合项目工作
4	积极协同项目工作	被动执行项目工作	不积极配合项目工作
5	不积极协同项目工作	积极推进项目工作	积极配合项目工作
6	不积极协同项目工作	积极推进项目工作	不积极配合项目工作
7	不积极协同项目工作	被动执行项目工作	积极配合项目工作
8	不积极协同项目工作	被动执行项目工作	不积极配合项目工作

3 演化博弈求解及稳定性分析

3.1 演化博弈求解

当企业选择积极与政府和社会协同项目工作时,其利益期望值为:

$$E_{c1} = E_c + yS_{gc} + (1-y)S'_{gc} - (1-z)S'_{pc} - C_c \quad (1)$$

当企业选择不积极与政府和社会协同项目工作时,其利益期望值为:

$$E_{c2} = E'_c + y\alpha S_{gc} + (1-y)\alpha S'_{gc} - \frac{(1-z)}{\alpha} S'_{pc} \quad (2)$$

计算得到企业的复制动态方程:

$$f(x) = x(1-x)[E_c - E'_c + y(1-\alpha)S_{gc} + (1-y)(1-\alpha)S'_{gc} + (1-z)\frac{1-\alpha}{\alpha}S'_{pc} - C_c] \quad (3)$$

同理可分别计算得到政府及社会的复制动态方程:

$$f(y) = y(1-y)[E_g - E'_g + x(1-\beta)S_{cg} + (1-x)(1-\beta)S'_{cg} + (1-z)\frac{1-\beta}{\beta}S'_{pg} - C_g] \quad (4)$$

$$f(z) = z(1-z)\{E_p - E'_p - C_p + C'_p + (1-\gamma)[x(S_{cp} - S'_{cp}) + y(S_{gp} - S'_{gp}) + S'_{cp} + S'_{gp}]\} \quad (5)$$

分别对各利益相关者的复制动态方程进行求导:

$$f'(x) = (1-2x)[E_c - E'_c + y(1-\alpha)S_{gc} + (1-y)(1-\alpha)S'_{gc} + (1-z)\frac{1-\alpha}{\alpha}S'_{pc} - C_c] \quad (6)$$

$$f'(y) = (1-2y)[E_g - E'_g + x(1-\beta)S_{cg} + (1-x)(1-\beta)S'_{cg} + (1-z)\frac{1-\beta}{\beta}S'_{pg} - C_g] \quad (7)$$

$$f'(z) = (1-2z)\{E_p - E'_p - C_p + C'_p + (1-\gamma)[x(S_{cp} - S'_{cp}) + y(S_{gp} - S'_{gp}) + S'_{cp} + S'_{gp}]\} \quad (8)$$

表 3 长江大保护工程演化博弈模型策略选择组合利益计算方法

组合编号	企业	政府	社会
1	$E_c + S_{gc} - C_c$	$E_g + S_{cg} - C_g$	$E_p + S_{cp} + S_{gp} - C_p$
2	$E_c + S_{gc} - S'_{pc} - C_c$	$E_g + S_{cg} - S'_{pg} - C_g$	$E'_p + \gamma S_{cp} + \gamma S_{gp} - C'_p$
3	$E_c + S'_{gc} - C_c$	$E'_g + \beta S_{cg}$	$E_p + S_{cp} + S'_{gp} - C_p$
4	$E_c + S'_{gc} - S'_{pc} - C_c$	$E'_g + \beta S_{cg} - (1/\beta)S'_{pg}$	$E'_p + \gamma S_{cp} + \gamma S'_{gp} - C'_p$
5	$E'_c + \alpha S_{gc}$	$E_g + S'_{cg} - C_g$	$E_p + S'_{cp} + S_{gp} - C_p$
6	$E'_c + \alpha S_{gc} - (1/\alpha)S'_{pc}$	$E_g + S'_{cg} - S'_{pg} - C_g$	$E'_p + \gamma S'_{cp} + \gamma S_{gp} - C'_p$
7	$E'_c + \alpha S'_{gc}$	$E'_g + \beta S'_{cg}$	$E_p + S'_{cp} + S'_{gp} - C_p$
8	$E'_c + \alpha S'_{gc} - (1/\alpha)S'_{pc}$	$E'_g + \beta S'_{cg} - (1/\beta)S'_{pg}$	$E'_p + \gamma S'_{cp} + \gamma S'_{gp} - C'_p$

3.2 演化博弈计算结果分析

企业、政府、社会 3 个利益相关者策略选择复制动态相位图如图 2 所示。

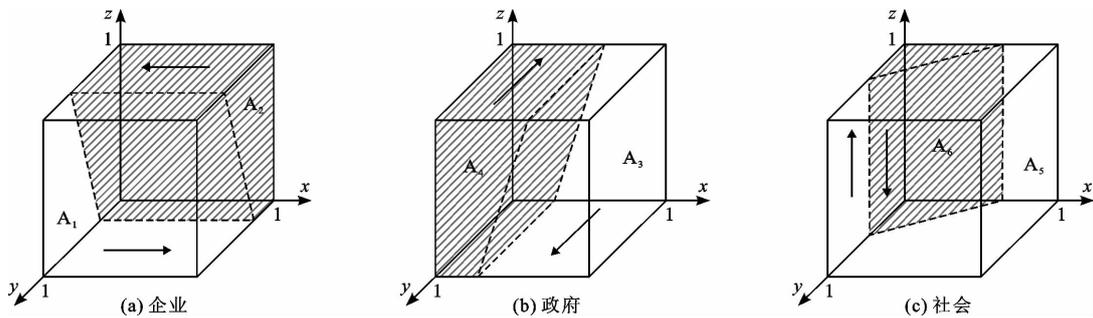


图 2 利益相关者策略选择复制动态相位图

(1) 企业策略选择演化博弈结果分析

对于企业方,令 $f(x) = 0$, 计算得到如下结果:

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = 1 \\ y = x_0 + K_1 \\ x_0 = \frac{S'_{pc}}{\alpha(S_{gc} - S'_{gc})}z \\ K_1 = \frac{\alpha(E_c - E'_c - C_c) + (1-\alpha)(\alpha S'_{gc} + S'_{pc})}{\alpha(1-\alpha)(S'_{gc} - S_{gc})} \end{cases} \quad (9)$$

如图 2(a) 所示,企业策略选择的复制动态相位图被 $y = x_0 + K_1$ 划分为 A_1 、 A_2 两个区域, $x = 0$ 、 $x = 1$ 皆为稳定点。当 $y = x_0 + K_1$ 时, $f(x) = 0$ 且 $f'(x) = 0$ 恒成立, x 取任意值皆满足进化稳定策略的条件,企业策略选择不能确定;当 $y > x_0 + K_1$ 时,处于 A_1 区域, $f'(0) > 0$, $f'(1) < 0$, $x = 1$ 满足进化稳定策略的条件,此时,企业方倾向于选择积极协同项目工作的策略;当 $y < x_0 + K_1$ 时,处于 A_2 区域, $f'(0) < 0$, $f'(1) > 0$, $x = 0$ 满足进化稳定策略的条件,此时,企业方倾向

于选择不积极协同项目工作的策略。综上,企业策略的选择受政府策略选择的影响,提高政府方选择积极推动项目工作策略的概率,有助于提高企业方选择积极协同项目工作策略的概率。

(2) 政府策略选择演化博弈结果分析

对于政府方,令 $f(y) = 0$, 计算得到如下结果:

$$\begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = 1 \\ x = y_0 + K_2 \\ y_0 = \frac{S'_{pg}}{\beta(S'_{cg} - S'_{cg})}z \\ K_2 = \frac{\beta(E'_g - E'_g - C'_g) + (1 - \beta)(\beta S'_{cg} + S'_{pg})}{\beta(1 - \beta)(S'_{cg} - S'_{cg})} \end{cases} \quad (10)$$

如图2(b)所示,政府方策略选择的复制动态相位图被 $x = y_0 + K_2$ 划分为 A_3 、 A_4 两个区域, $y = 0$ 、 $y = 1$ 皆为稳定点。当 $x = y_0 + K_2$ 时, $f(y) = 0$ 且 $f'(y) = 0$ 恒成立, y 取任意值皆满足进化稳定策略的条件,政府策略选择不能确定;当 $x > y_0 + K_2$ 时,处于 A_3 区域, $f'(0) > 0$, $f'(1) < 0$, $y = 1$ 满足进化稳定策略的条件,此时,政府方倾向于选择主动推进项目相关工作的策略;当 $x < y_0 + K_2$ 时,处于 A_4 区域, $f'(0) < 0$, $f'(1) > 0$, $y = 0$ 满足进化稳定策略的条件,此时,政府方倾向于选择被动执行项目相关工作的策略,综上,政府策略的选择受企业策略选择的影响,提高企业选择积极协同项目工作策略的概率,有助于提高政府选择主动推进项目工作策略的概率。

(3) 社会策略演化博弈结果分析

$$\begin{bmatrix} (1 - 2x)[E_c - E'_c + y(1 - \alpha)S_{gc} + (1 - y)(1 - \alpha)S'_{gc} + (1 - z)\frac{1 - \alpha}{\alpha}S'_{pc} - C_c] & x(1 - x)(1 - \alpha)(S_{gc} - S'_{gc}) & -x(1 - x)\frac{1 - \alpha}{\alpha}S'_{pc} \\ y(1 - y)(1 - \beta)(S_{cg} - S'_{cg}) & (1 - 2y)[E_g - E'_g + x(1 - \beta)S_{cg} + (1 - x)(1 - \beta)S'_{cg} + (1 - z)\frac{1 - \beta}{\beta}S'_{pg} - C_g] & -y(1 - y)\frac{1 - \beta}{\beta}S'_{pg} \\ z(1 - z)(1 - \gamma)(S_{gp} - S'_{gp}) & z(1 - z)(1 - \gamma)(S_{gp} - S'_{gp}) & (1 - 2z)\{E_p - E'_p - C_p + C'_p + (1 - \gamma)[x(S_{cp} - S'_{cp}) + y(S_{gp} - S'_{gp}) + S'_{cp} + S'_{gp}]\} \end{bmatrix} \quad (12)$$

利用复制动态方程的均衡原理,令3个利益相关者的复制动态方程均等于零,即 $f(x) = f(y) = f(z) = 0$, 得到整体系统的8个局部均衡点,当雅可比

对于社会方,令 $f(z) = 0$, 计算得到如下结果:

$$\begin{cases} z_1 = 0 \\ z_2 = 1 \\ y = z_0 - K_3 \\ z_0 = -\frac{S_{cp} - S'_{cp}}{S_{gp} - S'_{gp}}x \\ K_3 = \frac{E_p - E'_p - C_p + C'_p + (1 - \gamma)(S'_{cp} + S'_{gp})}{(1 - \gamma)(S_{gp} - S'_{gp})} \end{cases} \quad (11)$$

如图2(c)所示,社会方策略选择的复制动态相位图被 $y = z_0 - K_3$ 划分为 A_5 、 A_6 两个区域, $z = 0$ 、 $z = 1$ 皆为稳定点。当 $y = z_0 - K_3$ 时, $f(z) = 0$ 且 $f'(z) = 0$ 恒成立, z 取任意值皆满足进化稳定策略的条件,社会方的策略选择不能确定;当 $y > z_0 - K_3$ 时,处于 A_5 区域, $f'(0) > 0$, $f'(1) < 0$, $z = 1$ 满足进化稳定策略的条件,此时,社会倾向于选择积极配合项目相关工作的策略;当 $y < z_0 - K_3$ 时,处于 A_6 区域, $f'(0) < 0$, $f'(1) > 0$, $z = 0$ 满足进化稳定策略的条件,此时,社会倾向于选择不积极配合项目工作的策略。综上,社会方的策略选择会同时受到另外两方策略选择的影响,提高企业选择积极协同项目相关工作策略的概率 x 和提高政府选择积极推进项目相关工作的策略的概率 y , 有助于提高社会选择积极配合项目工作的概率 z 。

3.3 稳定性分析

根据企业、政府、社会3个利益相关者的复制动态方程,计算得到的系统演化博弈的雅可比矩阵(Jacobian matrix)如下所示。

矩阵的3个特征值均为负数时,该局部均衡点为稳定点,相应的策略选择即为系统的进化稳定策略^[21]。各均衡点及雅可比矩阵的特征值如表4所示。

表 4 3 个利益相关者博弈系统局部均衡点及雅可比矩阵特征值

局部均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3
$P_1(0,0,0)$	$E_c - E'_c + (1 - \alpha)S'_{gc} + \frac{1 - \alpha}{\alpha}S'_{pc} - C_c$	$E_g - E'_g + (1 - \beta)S'_{cg} + \frac{1 - \beta}{\beta}S'_{pg} - C_g$	$E_p - E'_p - C_p + C'_p + (1 - \gamma)(S'_{cp} + S'_{gp})$
$P_2(0,0,1)$	$E_c - E'_c + (1 - \alpha)S'_{gc} - C_c$	$E_g - E'_g + (1 - \beta)S'_{cg} - C_g$	$E'_p - E_p - C'_p + C_p - (1 - \gamma)(S'_{cp} + S'_{gp})$
$P_3(0,1,0)$	$E_c - E'_c + (1 - \alpha)S_{gc} + \frac{1 - \alpha}{\alpha}S'_{pc} - C_c$	$E'_g - E_g - (1 - \beta)S'_{cg} - \frac{1 - \beta}{\beta}S'_{pg} + C_g$	$E_p - E'_p - C_p + C'_p + (1 - \gamma)(S_{gp} + S'_{cp})$
$P_4(0,1,1)$	$E_c - E'_c + (1 - \alpha)S_{gc} - C_c$	$E'_g - E_g - (1 - \beta)S'_{cg} + C_g$	$E'_p - E_p - C'_p + C_p - (1 - \gamma)(S_{gp} + S'_{cp})$
$P_5(1,0,0)$	$E'_c - E_c - (1 - \alpha)S'_{gc} - \frac{1 - \alpha}{\alpha}S'_{pc} + C_c$	$E_g - E'_g + (1 - \beta)S_{cg} + \frac{1 - \beta}{\beta}S'_{pg} - C_g$	$E_p - E'_p - C_p + C'_p + (1 - \gamma)(S_{cp} + S'_{gp})$
$P_6(1,0,1)$	$E'_c - E_c - (1 - \alpha)S'_{gc} + C_c$	$E_g - E'_g + (1 - \beta)S_{cg} - C_g$	$E'_p - E_p - C'_p + C_p - (1 - \gamma)(S_{cp} + S'_{gp})$
$P_7(1,1,0)$	$E'_c - E_c - (1 - \alpha)S_{gc} - \frac{1 - \alpha}{\alpha}S'_{pc} + C_c$	$E'_g - E_g - (1 - \beta)S_{cg} - \frac{1 - \beta}{\beta}S'_{pg} + C_g$	$E_p - E'_p - C_p + C'_p + (1 - \gamma)(S_{cp} + S_{gp})$
$P_8(1,1,1)$	$E'_c - E_c - (1 - \alpha)S_{gc} + C_c$	$E'_g - E_g - (1 - \beta)S_{cg} + C_g$	$E'_p - E_p - C'_p + C_p - (1 - \gamma)(S_{cp} + S_{gp})$

为对各局部均衡点的稳定性进行讨论,做出如下假设:

(1)3 个利益相关者之间的策略选择有相互作用。当其中两方选择较为积极的策略时,第 3 方选择积极策略的总利益大于选择消极策略的总利益;反之,当其中两方选择较为消极的策略时,第 3 方选择积极策略的总利益小于选择消极策略的总利益。

(2)企业、政府之间的策略选择相互作用相对较强,与社会之间的相互作用相对较弱。当企业、政府其中一方选择积极的协同策略,而社会方选择消极策略时,另一方选择积极策略的总利益大于选择消极策略的总利益;反之,当企业、政府其中一方选择消极策略,而社会方选择积极策略时,另一方选择积极策略的总利益小于选择消极策略的总利益。

(3)假设政府的选择策略对社会方利益的影响较大,企业的策略选择对社会方利益的影响相对较小。当仅有政府采取较为积极的策略时,则社会选择积极策略的总利益大于选择消极策略的总利益;当仅有企业采取较为积极的策略时,则社会选择积极策略的总利益小于选择消极策略的总利益。

基于上述假设,对系统各局部均衡点进行稳定性分析,结果如表 5 所示。

表 5 系统局部均衡点的稳定性

局部均衡点	特征根符号	稳定性
$P_1(0,0,0)$	(-, -, -)	稳定点
$P_2(0,0,1)$	(-, -, +)	非稳定点
$P_3(0,1,0)$	(+, +, +)	鞍点
$P_4(0,1,1)$	(+, +, -)	非稳定点
$P_5(1,0,0)$	(+, +, -)	非稳定点
$P_6(1,0,1)$	(+, +, +)	鞍点
$P_7(1,1,0)$	(-, -, +)	非稳定点
$P_8(1,1,1)$	(-, -, -)	稳定点

4 演化博弈仿真分析

为验证上述分析所得到的进化稳定策略的稳定性,并对协同成本、协同效应的变化进行仿真模拟,基于系统动力学原理建立仿真模型,模拟多种情况下各利益相关者之间的演化博弈过程与结果。

4.1 仿真模型建立

针对企业、政府、社会3个利益相关者进行演化博弈仿真计算,根据仿真研究对象将模型划分为3个区域,构建如图3所示的三方演化博弈仿真模型。

为便于进行预测模型的建立,共设置35个参数来表示三方演化博弈模型中的变量,并对参数进行赋值,构建算例进行仿真分析,仿真模型各参数及取值如表6所示。

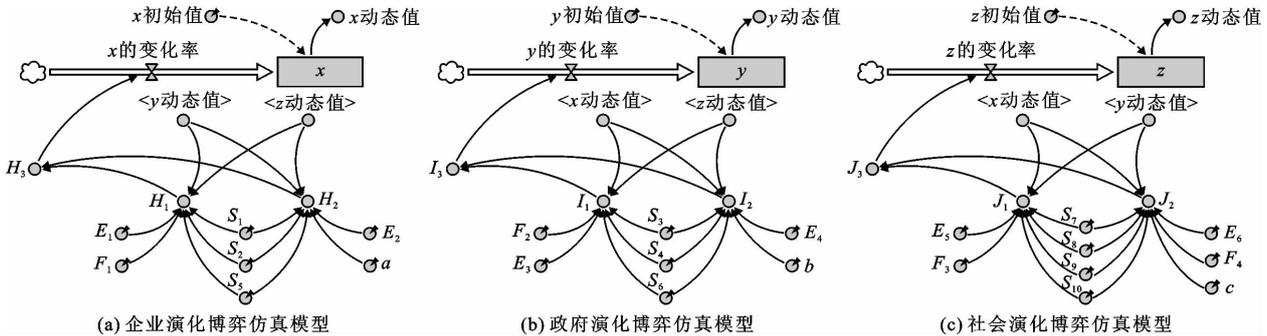


图3 三方演化博弈仿真模型

表6 三方演化博弈仿真模型参数设置

参数	对应变量	取值	参数	对应变量	取值	参数	对应变量	取值
E_1	E_c	10	S_3	S_{cg}	2.4	F_4	C'_p	1.5
E_2	E'_c	9	S_4	S'_{cg}	1.4	H_1	企业积极协同工作利益期望值	
E_3	E_g	9	S_5	S'_{pc}	0.3	H_2	企业不积极协同工作利益期望值	
E_4	E'_g	8	S_6	S'_{pc}	0.3	H_3	$H_1 - H_2$	
E_5	E_p	2	S_7	S_{cp}	0.65	I_1	政府主动推进工作利益期望值	
E_6	E'_p	1.8	S_8	S'_{cp}	0.55	I_2	政府被动执行工作利益期望值	
a	α	0.8	S_9	S_{gp}	1	I_3	$I_1 - I_2$	
b	β	0.8	S_{10}	S'_{gp}	0.8	J_1	社会积极配合工作利益期望值	
c	γ	0.8	F_1	C_c	1.5	J_2	社会不积极配合工作利益期望值	
S_1	S_{gc}	2.8	F_2	C_g	1.4	J_3	$J_2 - J_3$	
S_2	S'_{gc}	1.8	F_3	C_p	2			

4.2 仿真计算与结果

4.2.1 稳定点的稳定性验证 通过仿真分析,对使用复制动态方法计算得到的各局部均衡点进行验证,结果表明,稳定点为 $P_1(0,0,0)$ 和 $P_8(1,1,1)$,仿真结果如图4所示,两个稳定点中,各利益相关者的策略选择保持稳定,与稳定性分析结果一致。

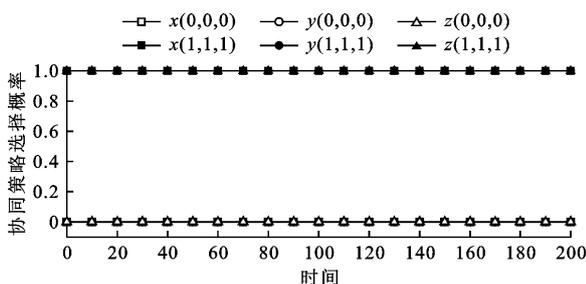


图4 稳定点仿真分析结果

4.2.2 协同成本对演化结果的影响 为研究协同成本变化对演化结果的影响,模拟企业和政府协同成本的增减进行仿真分析,得出的协同成本影响下的仿真结果见图5。

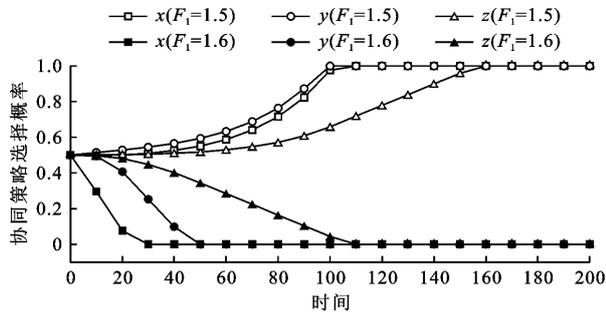
如图5(a)、5(b)所示,对于初始参数设置,令3个利益相关者采取积极策略的概率初始值皆为0.5,经过仿真计算, x, y, z 皆收敛于1,其中 y 收敛速度最快。对于企业的协同成本, $F_1 = 1.5$ 时,系统整体向协同的方向演化, $F_1 = 1.6$ 时,系统向不协同的方向演化, F_1 的临界值在1.5~1.6之间;对于政府的协同成本, $F_2 = 1.4$ 时,系统整体向协同的方向演化, $F_2 = 1.5$ 时,系统向不协同的方向演化, F_2 的临界值在1.4~1.5之间。

如图5(c)、5(d)所示,当 F_1 从1.5降低为1.2时,企业、政府、社会协同选择的收敛时间分别缩短

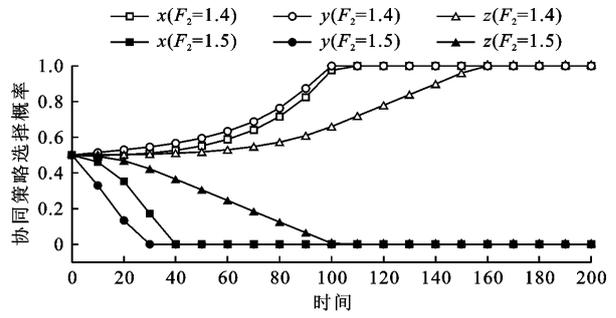
为 9、28、96;当 F_2 从 1.4 降低为 1.1 时,企业、政府、社会协同选择的收敛时间分别缩短为 31、8、92。即协同成本 F_1 或 F_2 降低时,各利益相关者选择积极策略的概率向 1 收敛的速度加快,并且成本降低的一方收敛速度更快。

如图 5(e)、5(f) 所示,当 F_1 从 1.6 增加为 1.8

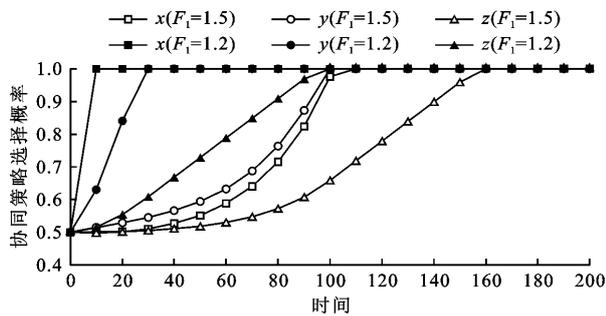
时,企业、政府、社会 3 个利益相关者协同选择的收敛时间分别缩短为 9、33、97;当 F_2 从 1.5 增加为 1.7 时,企业、政府、社会 3 个利益相关者协同选择的收敛时间分别缩短为 30、9、92。即协同成本 F_1 、 F_2 增加时,各利益相关者选择积极策略的概率向 0 收敛的速度越加快,并且成本增加的一方收敛速度更快。



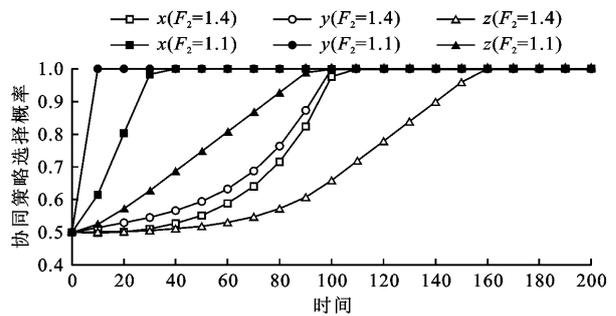
(a) 企业协同成本临界值



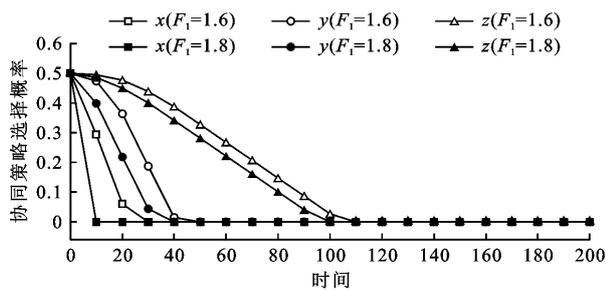
(b) 政府协同成本临界值



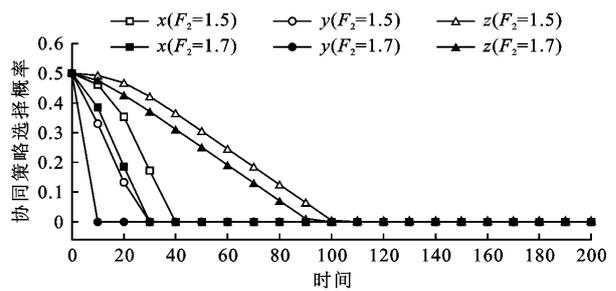
(c) 企业协同成本降低



(d) 政府协同成本降低



(e) 企业协同成本增加



(f) 政府协同成本增加

图 5 协同成本影响下的演化博弈仿真结果

4.2.3 协同效应对演化结果的影响 本研究中的协同效应包括正面效应和负面效应,其中正面效应指协同效应的提升,仅在采取积极策略时出现;负面效应指社会方对企业、政府方工作的干扰,仅在社会方采取消极策略时出现。协同效应影响下的仿真结果见图 6。

如图 6(a)、6(b) 所示,企业对政府的协同作用 S_3 增加 0.2 时,则企业、政府和社会策略选择的收敛时间分别缩短为 54、44、113,而当 S_3 减小 0.2 时,3 个利益相关者策略选择向不协同的方向收敛,收敛时间分别为 108、112、165;与企业对政府的协同作

用相似,政府对企业的协同作用 S_1 增加 0.2 时,则收敛时间也有所缩短,而当 S_1 减小 0.2 时,各利益相关者的策略选择演化方向改变。

如图 6(c)、6(d) 所示,企业对社会的协同作用 S_7 增加 0.05 时,则企业、政府不同策略选择的利益差减小,使其协同选择的收敛时间分别延长为 81、75,而社会协同选择的收敛时间缩短为 109,当 S_7 减小 0.05 时,企业、政府不同策略选择的利益差增大,其协同选择的收敛时间分别缩短为 68、63,社会协同选择的收敛时间延长为 179;与企业对社会的协同作用类似,政府对社会的协同作用 S_9 增加 0.1 时,企业、政府协同选择的收敛时间延长,社会协同

选择的收敛时间缩短,而当 S_9 减小 0.1 时,企业、政府协同选择的收敛时间缩短,社会协同选择的收敛时间延长。

如图 6(e)、6(f)所示,社会对企业的干扰 S_5 增加 0.02 时,则增加了各利益相关者不同策略选择下的利益差,使得企业、政府、社会协同选择的收敛时

间分别缩短为 69、65、128,而当 S_5 减小 0.02 时,企业、政府、社会在不同策略选择下的利益差也随之减小,收敛时间分别延长为 79、73、135;当社会对政府的干扰 S_6 增加 0.02 时,企业、政府、社会收敛时间缩短,而当 S_6 减小 0.02 时,企业、政府、社会收敛时间延长。

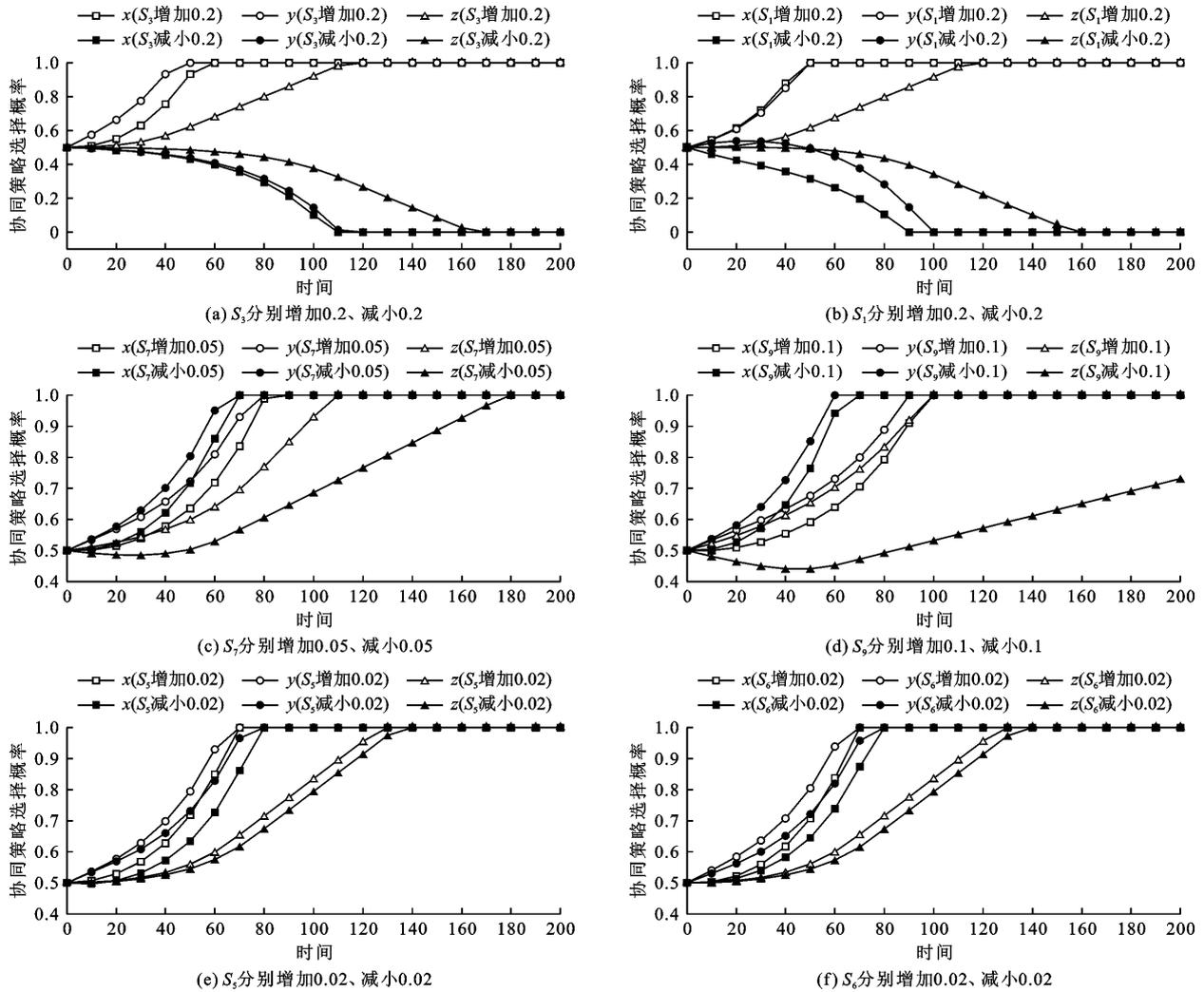


图 6 协同效应影响下的演化博弈仿真结果

4.3 仿真结果讨论分析

对局部均衡点、协同成本影响、协同效应影响下的仿真结果进行如下讨论分析:

(1) 计算得到的 8 个局部均衡点中,仅有 $P_1(0, 0, 0)$ 、 $P_8(1, 1, 1)$ 两点为稳定点,说明企业、政府、社会的策略选择之间具有趋同性,即只有各方策略选择一致时,系统才能保持稳定。

(2) 协同成本相对临界值的变化越大,各利益相关者利益选择概率的收敛时间越短,且协同成本发生变化的一方收敛时间缩短幅度最大。即,协同成本越低、协同效应越强,则不同策略的利益差越

大,越容易演化为选择积极策略;反之,协同成本越高、协同效应越弱,则越容易演化为选择消极策略。

(3) 当协同作用发生变化时,对系统演化的影响与相关对象有关。如协同作用为企业与政府之间的作用,三者收敛时间的变化与协同作用变化正相关。当协同作用为社会消极策略下对企业或政府的干扰时,干扰越大,则 3 个利益相关者不同策略之间的利益差越大,收敛时间越短,干扰越小则收敛时间越长。模型通过计算积极策略与消极策略的利益差来判断系统的演化方向,且演化速度与利益差成正比,根据复制动态方程,当企业、政府对社会的协同

效应增加时,会缩短企业、政府各自不同策略的利益差,造成两者策略选择概率收敛速度的减慢;同理,当企业、政府对社会的协同效应减小时、政府各自的利益差会扩大,造成两者收敛速度的加快。

5 系统协同优化策略

从以上演化博弈分析与仿真计算的结果可以得出,3个利益相关者的策略选择与协同成本、协同作用有关,系统协同优化路径可概括为降低协同成本、增强协同作用、减小协同干扰3个方面,基于对实际工程的调研,从信息协同、利益协同的角度提出如下优化策略。

信息协同是工程建设系统运行的基础^[22],长江大保护工程数据具有规模大、多源异构、主体关系复杂、动态变化的特点,在信息协同方面,应加强信息标准化和信息平台的建设与推广。(1)通过统一的处理标准,使多源异构的信息能够被各工程建设相关主体无障碍存储、交互和处理,实现信息标准化,可以从信息编码与储存标准化、信息格式标准化、信息交互流程标准化3个方面进行相关改进工作,进而降低由于各主体之间信息标准不同而造成的信息处理成本,减少由于信息理解偏差而导致的利益损失。(2)在信息平台的构建过程中,应充分结合工程需要,基于IFC(industry foundation classes)标准,构建以BIM(building information modeling)、GIS(geographic information systems)技术为核心的系统平台,并在参建各方中进行推广应用,实现勘测信息、设计信息、资源供应信息、工程面貌信息等信息的管理和集成^[23]。对不同对象、不同阶段、不同子项目进行信息集成,将各部分的需求、依据、标准、目标等进行整合,避免因各部分的相对独立性造成业务信息的脱节。

利益协同是指为了实现利益总量与分配的最优而进行的协同活动,包括优化利益分配机制、优化激励机制两个部分。在进行利益分配时,企业方应给予足够的重视,以整体最优、收益与投入对称为原则,充分考虑投入的资源、承担的风险、合同的执行情况、对总体利益的贡献等因素,体现项目分配的公平和效率^[24]。在激励机制优化方面,企业方与政府方应优化合同结构,设计更为合理的激励机制,基于政策鼓励、资金支持等正向手段激发各利益相关者对工程建设相关工作的积极性,使其在获取自身利益的同时能够选择最有利于整体利益的行动^[25];同时,企业方与政府方还应加强对项目的监督和管理,

优化惩罚机制与管理流程,培养各利益相关者正向的文化价值观,减少投机行为的发生^[26],并在保证整体利益的同时降低监督管理所造成的成本。

6 结论

本文针对长江大保护工程建设管理复杂、工程建设与城市功能运行交织的特点,以企业、政府和社会为利益相关者,构建了三方演化博弈模型,系统分析了企业、政府和社会策略选择的演化过程,并结合仿真计算,分析了协同成本和协同效应对三方策略选择的影响,主要结论如下:

(1)企业、政府、社会三方的策略选择具有趋同性,各方策略选择一致时,系统才能保持稳定;三方的策略选择受协同成本和协同效应影响,协同成本越低、协同效应越强,则越容易演化为选择积极策略;当企业、政府对社会的协同效应增加时,系统演化的速度会有所减慢。

(2)相比于其他工程建设策略选择演化博弈研究,本文考虑了社会方对工程建设的影响,能够反映长江大保护工程建设与城市功能运行之间的相互干扰,得到的结果更能反映长江大保护工程建设的真实情况。

(3)本文提出了降低协同成本、增强协同作用、减小协同干扰3个系统协同优化的路径,并从信息协同和利益协同的角度,提出加强信息标准化和信息平台建设以及推广和优化利益分配机制、优化激励机制等优化策略。

本文的局限性有两点:一是仅对长江大保护工程进行了整体性的研究,尚未对具体问题和内容做出具体分析,未来可针对资源配置与运输、信息交互等方面进行具体分析;二是模型仿真分析的结果是基于拟定参数而得到的,是对实际情况的概括,不一定能够完全反映客观情况,未来可以结合实际工程,划分各利益相关者的层级,基于协同成本和协同效应等方面的评价方法获取实际数据,进行更加精细的研究。

参考文献:

- [1] 刘毅,周成虎,王传胜,等.长江经济带建设的若干问题与建议[J].地理科学进展,2015,34(11):1345-1355.
- [2] 陆大道.长江大保护与长江经济带的可持续发展——关于落实习总书记重要指示,实现长江经济带可持续发展的认识与建议[J].地理学报,2018,73(10):1829-1836.
- [3] 张精忠.大型工程项目复杂性对施工界面风险的影响研

- 究[D]. 天津:天津大学,2018.
- [4] 李国超. 基于协同学的模块化物流系统演化过程与协同度测定研究[D]. 大连:大连海事大学,2013.
- [5] 张晓娟. 供应链信息协同机制及其分析评价[D]. 保定:华北电力大学,2011.
- [6] 沈瑞昌,李 琴,陈家宽. 基于文献计量的长江保护研究特征与科技支撑建议[J]. 人民长江,2022,53(1):43-53.
- [7] 管林杰,张钟海,张 力. 长江大保护时空大数据平台建设研究[J]. 长江信息通信,2021,34(9):82-85.
- [8] 翁文林,吕永鹏,唐晋力. 长江大保护城镇污水处理新模式新机制实践与探索[J]. 给水排水,2021,57(11):48-53.
- [9] WANG Gang, CHAO Yuechao, CAO Yong. A comprehensive review of research works based on evolutionary game theory for sustainable energy development[J]. Energy Reports, 2022, 8: 114-136.
- [10] 达庆利,张骥骧. 有限理性条件下进化博弈均衡的稳定性分析[J]. 系统工程理论方法应用,2006,15(3):279-284.
- [11] 曲 娜. 基于自组理论的工程项目组织演化动力机制研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [12] LIU Jicheng, YU Jing, YIN Yu, et al. An evolutionary game approach for private sectors' behavioral strategies in China's green energy public-private partnership projects[J]. Energy Reports, 2021, 7(7): 696-715.
- [13] 钟 云,丰景春,薛 松,等. PPP项目利益相关者关系演化动力的实证研究[J]. 工程管理学报,2015,29(3):94-99.
- [14] YUAN Mengqi, LI Zhongfu, LI Xiaodong, et al. How to promote the sustainable development of prefabricated residential buildings in China: A tripartite evolutionary game analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 349: 131423.
- [15] 梁秀峰,张飞涟,颜红艳. 基于演化博弈的PPP项目绩效支付机制仿真与优化[J]. 中国管理科学,2020,28(4):153-163.
- [16] 贾斯佳. 面向利益相关者的PPP项目收益分析与仿真研究[D]. 南京:东南大学,2018.
- [17] LIU Kai, LIU Yufeng, ZHOU Hongmin, et al. Evolutionary game and numerical simulation of participants' collaborative behavior in integrated project delivery project[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 373-385.
- [18] WANG Haoyang, GAO Lei, JIA Ying. The predicament of clean energy technology promotion in China in the carbon neutrality context: Lessons from China's environmental regulation policies from the perspective of the evolutionary game theory [J]. Energy Reports, 2022, 8: 4706-4723.
- [19] 徐一元. 公私合作(PPP)项目利益相关者利益协调机制研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.
- [20] 张廷熙,仇 蕾. 企业间水污染物排放权交易价格竞争博弈[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):83-86+92.
- [21] 杜志平,区钰贤. 基于三方演化博弈的跨境物流联盟信息协同机制研究[J/OL]. 中国管理科学,2021:1-12. (2021-11-04) [2022-12-12]. DOI: 10. 16381/j. cnki. issn1003-207x. 2020. 0416.
- [22] 张令荣. 供应链协同度评价模型研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- [23] 张社荣,姜佩奇,吴正桥. 水电工程设计施工一体化精益建造技术研究进展——数字孪生应用模式探索[J]. 水力发电学报,2021,40(1):1-12.
- [24] 徐 健. IPD模式下PPP项目利益相关者收益分配研究[D]. 西安:长安大学,2019.
- [25] 鹿中山. 工程监理服务评价及激励机制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
- [26] 吕庆平. 基于协同效应的PPP项目风险分担、激励和监督惩罚模型研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

