

# 区块链赋能的施工现场环境污染协同治理策略研究

钟波涛,杨静,图玛尔·哈得勒别克,张鹭

(华中科技大学土木与水利工程学院,武汉430074;国家数字建造技术创新中心,武汉430074)

**摘要:**针对施工污染治理存在地方政府激励效果不显著、治理主体内在动力不足等困境,提出以区块链赋能的施工现场环境污染监管平台为载体的治理模式,构建地方政府与施工企业协同治理演化博弈模型,分析区块链技术与政府激励措施的影响机理。研究表明:地方政府提高技术赋能效果(增效收益)、加强直接激励措施(罚金增量和绿色补贴增量)、积极引导市场增强间接激励措施(施工企业潜在收益和损失系数)可提高施工企业积极性,最终实现协同治理。值得注意的是在平台推广初期,绿色补贴不变或适当减少反而有利于促进协同治理,且在平台应用过程中,施工企业对潜在损失比潜在收益更加敏感。

**关键词:**施工现场;环境污染;协同治理;区块链

**DOI:**10.13956/j.ss.1001-8409.2025.01.11

**中图分类号:**TP311.13;X799.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-8409(2025)01-0085-08

## Blockchain-enabled On-site Environmental Pollution Collaborative Governance Strategies

ZHONG Bo-tao, YANG Jing, TUMAR Hadelebieke, ZHANG Lu

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Wuhan 430074)

**Abstract:** Current government incentives lack impact, and intrinsic motivation among participants is insufficient. A governance model based on the blockchain-enabled on-site construction environmental monitoring platform is proposed. Then, an evolutionary game model between local governments and construction companies is developed to analyze the influence mechanism of blockchain technology and government incentives. The results indicate that increasing technology-enabled benefits (incremental gains), direct (fines, green subsidies), and indirect (potential gains and losses for construction firms) government incentives foster synergistic governance. Notably, during the early implementation of the synergistic governance model, sustaining or prudently reducing green subsidies can enhance the adoption of collaborative strategies. In the platform application, construction firms are more attuned to losses than gains.

**Key words:** construction site; environmental pollution; collaborative governance; blockchain

### 引言

建筑业污染治理是实现“双碳”目标的关键,施工现场环境污染影响生态环境和居民健康<sup>[1,2]</sup>。尽管我国已发布相关法律法规<sup>[3]</sup>,但鉴于施工现场环境污染治理具有地域性、临时性和技术滞后性等特点,仍存在虚假信息上报、权力寻租、责任难追溯等问题。传统以地方政府监管为主的治理模式难以调动施工企业积极性<sup>[2]</sup>,《国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知》(国发〔2021〕)指出区块链等新技术正在变革治理模式,鼓励监管部门加快转型并制定有效的激励措施。因此,地方政府如何利用新技术激发治理主体能动性,提高施

工现场环境污染治理效果成为重要议题<sup>[4]</sup>。

一方面,地方政府可加强监管力度<sup>[5]</sup>、制定激励措施<sup>[6,7]</sup>或促进协同治理<sup>[8]</sup>。杨增科等<sup>[8]</sup>提出政府监管力度和激励措施对协同治理的影响机制。朱红章等<sup>[9]</sup>提出公众参与下政府监管态度和施工企业治理行为的演化机制。综上可知,政策激励可促进协同治理<sup>[10]</sup>,而激励措施有直接和间接激励<sup>[11]</sup>,且政府正逐步引导建筑业将企业历史环境治理数据纳入到招投标等过程以提高企业的能动性,故探究间接激励下施工企业积极治理的内在动力具有实际意义。另一方面,地方政府可引入新技术变革治理模式。区块链技术凭借其防篡改、可追溯

收稿日期:2024-01-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3801700);国家自然科学基金项目(72271106);重点联合基金项目(U21A20151)

作者简介:钟波涛(1978—),男,湖北随州人,博士、教授,研究方向为智能建造及其系统工程、建筑行业治理与工程管理;杨静(1990—),女,山西运城人,博士研究生、讲师,研究方向为智能建造与管理、服务型建造;图玛尔·哈得勒别克(1999—),女,新疆阿勒泰人,硕士研究生,研究方向为工程供应链管理(通讯作者);张鹭(1992—),女,江西吉安人,硕士,研究方向为区块链与工程管理。

等特点可提高施工现场环境污染治理效果<sup>[2]</sup>。然而,引入区块链会影响参与方行为决策,如其可追溯性影响政府和企业的策略选择<sup>[12]</sup>、透明性提高被监管者的信任度<sup>[13]</sup>、不可篡改性影响参与者信用<sup>[14]</sup>。政策是区块链应用的核心条件<sup>[14]</sup>,政策激励和区块链投入共同影响企业行为决策<sup>[15]</sup>,且政策的激励作用影响区块链产业发展<sup>[7]</sup>,故研究区块链赋能和政府激励双重作用下协同治理的内在机理具有理论意义。

区块链赋能的治理模式存在协同机制不完善、区块链采纳成本高、激励政策不健全等困境。施工企业可能因治理成本高而采取消极治理,地方政府可能因开发成本高而缺乏治理模式变革动力,容忍施工企业消极治理行为。二者依据对方策略动态调整自身策略的过程具备演化博弈特征<sup>[16]</sup>,故本文充分考虑区块链技术赋能效果、政策的直接和间接激励效益,构建地方政府与施工企业演化博弈模型,分析关键因素的影响机制,并回答:区块链如何赋能环境污染治理?系统策略选择如何动态演化并最终达到平衡?博弈双方实现协同治理的条件是什么?如何提高施工企业积极性?本文的主要贡献为:提出基于区块链的施工现场环境污染协同治理新模式,揭示新模式下博弈双方实现协同治理的内在动力,明确技术赋能和激励措施的耦合作用,为地方政府推行区块链赋能的治理模式提供理论支持。

### 1 基于区块链的施工现场环境污染协同治理模式

传统模式下,施工现场环境污染治理主要涉及地方政府、施工企业、建设单位和监理单位。地方政府作为社会公共利益代表,颁布环境污染防治政策和奖惩措施,施工企业根据政府政策和监管制度治理污染,双方治理力度直接决定治理效果<sup>[17]</sup>。建设单位和监理单位起到支持和辅助施工企业的作用,间接影响治理效果<sup>[18]</sup>,故地方政府和施工企业为主要治理主体。传统治理模式为层级架构(图1),存在治理主体间信息传递不及时、不完整的弊端。

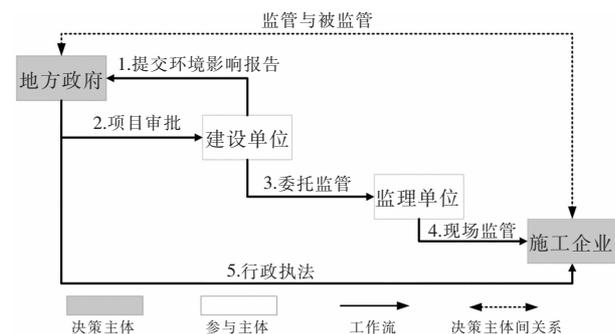


图1 传统施工现场环境污染治理模式

区块链确保数据完整和共享<sup>[2,19]</sup>,消除信息层级传递的弊端,促进层级架构向网状架构转变,以形成区块链赋能的协同治理模式(图2)。该模式以基于区块链的施工现场污染监管平台(B-OCEM平台)为载体,施工企业和地方政府为主要治理主体,并对治理主体产生以下影响:实现数据公开透明,供公众等第三方查阅,提高地方政府公信力;保证数据真实可靠,增强地方政府

激励措施效果;保证数据可追溯,增大施工企业违规成本,降低地方政府人工追溯成本,但增加区块链投入成本;智能合约加快环境监管流程,提高施工企业的业务效率。

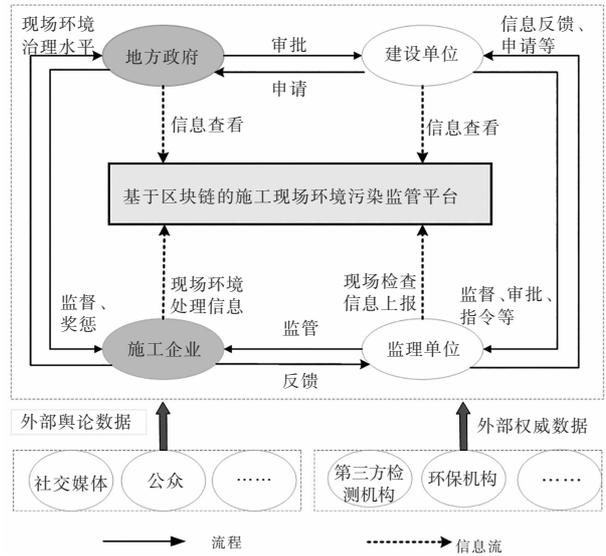


图2 基于区块链的施工现场环境污染治理模式

施工企业和地方政府依托B-OCEM平台形成协同治理体系(图3)。二者之间的协同治理机制为:地方政府基于平台降低监管与溯源成本,提高监管效率,采取积极治理的行为;地方政府积极治理时,会制定奖惩措施激励施工企业并提升政府的公信力;施工企业应用平台提高业务效率和治理信息透明度,并在政策激励下积极治理环境污染。

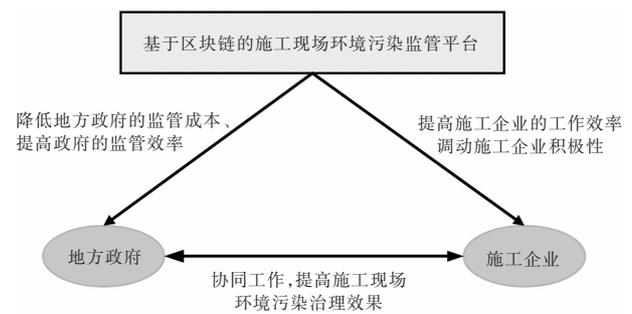


图3 基于B-OCEM平台的施工现场环境协同治理体系

## 2 演化博弈模型构建

### 2.1 问题描述

协同治理新模式下,地方政府制定奖惩措施激励施工企业,施工企业权衡损益后采取积极治理行为,形成稳定的协同治理机制。二者的利益诉求见图4,地方政府具有监管职责,追求政绩、公信力、区域经济效益最大化,有传统监管和B-OCEM平台监管两种策略。传统监管时,其监管成本低,但可能因权力寻租行为而使公信力受损;平台监管可提高治理效果和公信力,但增加技术开发等支出。施工企业是环境污染的生产者和治理者,关注经济利益、社会责任、企业声誉等,有积极治

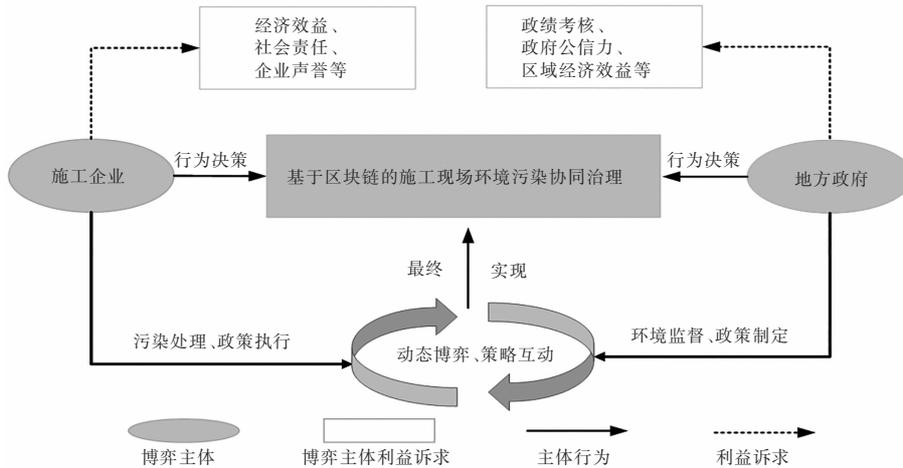


图4 地方政府和施工企业利益诉求分析

理和消极治理两种策略。积极治理时,会提高社会责任履行水平和企业声誉、增加治理成本;反之,会降低治理成本,但损害企业声誉和社会责任履行水平。

本文基于协同治理博弈模型<sup>[8]</sup>,构建协同治理新模式演化博弈模型,揭示治理主体策略选择机理。创新之处在于:从技术层面,考虑区块链技术引入对双方收益函数的影响;从政策层面,考虑政府通过间接激励引导企业环境治理的事实,如《浙江省企业环境信用评价管理办法(试行)》(ZJSP64-2020-0001)鼓励在招标中纳入企业环境信用信息,深入探究间接激励措施对施工企业收益的影响机理。

### 2.2 模型假设

假设1:施工企业和地方政府为有限理性群体,均追求自身利益最大化。

假设2:施工企业策略选择为积极治理和消极治理。积极治理代表施工企业采取主动管控,遵守法律法规的行为。消极治理代表施工企业采取投机取巧,甚至违反法律法规的行为。地方政府策略选择为B-OCEM平台监管和传统监管。

假设3:施工企业选择积极治理和消极治理的比例分别为 $x(0 \leq x \leq 1)$ 和 $1-x$ 。地方政府选择B-OCEM平台监管和传统监管的比例分别为 $y(0 \leq y \leq 1)$ 和 $1-y$ 。

假设4:地方政府选择B-OCEM平台监管存在平台开发等额外成本<sup>[14]</sup>,故采用B-OCEM平台监管的增量成本是 $C_1$ ,施工企业积极治理的增量成本是 $C_2$ 。

假设5:地方政府采用B-OCEM平台监管时,会获得中央政府补贴 $M$ ,包括财政转移、政绩考核和区域经济效益等。平台保证数据不可篡改和公开透明,提高地方政府公信力,故当施工企业积极治理时,地方政府采用B-OCEM平台监管会产生增效收益 $\beta Q$ ,其中 $Q$ 为传统监管的基本收益, $\beta(\beta \geq 0)$ 是收益提高系数,B-OCEM平台监管时 $\beta > 0$ ,传统监管时 $\beta = 0$ 。区块链的智能合约可实现业务自动执行,提高施工企业业务审批速度,故B-OCEM平台监管下,施工企业积极治理会产生增效收益 $Z$ 。

假设6:传统监管下,地方政府追溯和取证时数据获取成本为 $C_{cs}$ 。B-OCEM平台监管实现数据共享和追

溯,地方政府数据获取成本为0,但需承担平台维护费用 $C_{bw}$ <sup>[20]</sup>,且 $C_{bw} < C_{cs}$ 。

假设7:施工企业积极治理时,地方政府给予绿色补贴作为直接激励。为简化参数,采用B-OCEM平台监管模式下绿色补贴增量作为参数,即绿色补贴增量 $I(I \in R)$ 。当施工企业消极治理时,地方政府需承担环境污染造成的生态损失 $P$ 。政府采用B-OCEM平台监管时,施工企业消极治理需要缴纳施工污染罚金增量 $F$ 。

假设8:B-OCEM平台会记录施工企业的治理行为,地方政府利用平台内的信息作为施工企业绿色绩效、评奖评优、中标机率的重要指标间接激励施工企业积极治理。当施工企业积极治理时,平台内的积极治理信息可产生潜在收益 $R$ ,反之,消极治理信息会产生潜在损失 $V$ 。 $R$ 和 $V$ 分别与地方政府重视施工企业积极与消极治理行为的政策影响力有关。考虑不同地方政府的影响力、信息吸收或转换能力的差异性,假设 $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 、 $\lambda(0 < \lambda < 1)$ 为潜在收益和潜在损失系数,分别代表地方政府对施工企业积极和消极治理信息的利用率,施工企业的最终潜在收益和损失分别为 $\alpha R$ 和 $\lambda V$ 。

表1 博弈模型参数

参与主体	符号	含义	数值范围
地方政府	$C_1$	B-OCEM平台监管的增量成本	$> 0$
	$Q$	基本收益	$> 0$
	$\beta$	收益提高系数	$\geq 0$
	$M$	中央政府的补贴	$> 0$
	$P$	施工污染造成的生态损失	$> 0$
	$F$	施工污染罚金增量	$\geq 0$
	$I$	绿色补贴增量	$R$
	$C_{cs}$	传统模式下获取环境治理数据成本	$> 0$
	$C_{bw}$	B-OCEM平台维护成本	$> 0$
	$R$	B-OCEM平台监管下的潜在收益	$\geq 0$
施工企业	$V$	B-OCEM平台监管下的潜在损失	$\geq 0$
	$C_2$	积极治理的增量成本	$> 0$
	$\alpha$	施工企业潜在收益系数	$0 < \alpha < 1$
	$\lambda$	施工企业潜在损失系数	$0 < \lambda < 1$
	$Z$	B-OCEM平台监管下的增效收益	$> 0$

2.3 模型构建

基于上述假设,施工现场环境污染协同治理的收益矩阵见表2。

表2 施工企业-地方政府博弈收益矩阵

施工企业	地方政府	
	B-OCEM平台监管(y)	传统监管(1-y)
积极治理(x)	$\alpha R + Z + I - C_2,$ $Q(1 + \beta) + M - C_1 - C_{bw} - I$	$- C_2,$ $Q - C_{CS}$
消极治理(1-x)	$- F - \lambda V,$ $Q + M + F - C_1 - C_{bw} - P$	$0,$ $Q - P - C_{CS}$

施工企业积极和消极治理的期望收益分别为  $E_x$  和  $E_{1-x}$ , 其平均期望收益为  $E_1$ :

$$E_x = y(\alpha R + Z + I - C_2) + (1 - y)(-C_2) \quad (1)$$

$$E_{1-x} = y(-F - \lambda V) \quad (2)$$

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

施工企业的动态复制方程为:

$$\frac{dx}{dt} = -x(x-1)(yF + yI + yZ + y\alpha + y\lambda V - C_2) \quad (4)$$

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)[(\alpha R + I + F + Z + \lambda V)y - C_2] & x(1-x)(I + F + Z + \lambda V + \alpha R) \\ y(1-y)(\beta Q - F - I) & (1-2y)[(\beta Q - F - I)x + C_{CS} + M + F - C_1 - C_{bw}] \end{bmatrix}$$

若某均衡点满足  $\text{Det}J > 0$  且  $\text{Tr}J < 0$ , 则该均衡点为演化稳定均衡点(ESS)<sup>[21]</sup>。由于均衡点  $(x^*, y^*)$  的  $\text{Tr}J$

地方政府选择 B-OCEM 平台和传统监管的期望收益分别为  $E_y$  和  $E_{1-y}$ , 其平均期望收益为  $E_2$ :

$$E_y = x[Q(1 + \beta) + M - C_1 - C_{bw} - I] + (1 - x)(Q + M + F - C_1 - C_{bw} - P) \quad (5)$$

$$E_{1-y} = x(Q - C_{CS}) + (1 - x)(Q - P - C_{CS}) \quad (6)$$

$$E_2 = yE_y + (1 - y)E_{1-y} \quad (7)$$

地方政府的复制动态方程为:

$$\frac{dy}{dt} = y(y-1)(C_1 + C_{bw} - C_{CS} - F - M + xF + xI - x\beta Q) \quad (8)$$

3 基于 B-OCEM 平台的系统均衡点稳定性分析

3.1 系统稳定性分析

协同治理二维动力系统由式(4)和式(8)组成, 系统的5个局部稳定点分别为  $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(x^*, y^*)$ , 其中  $x^* = \frac{C_1 + C_{bw} - C_{CS} - F - M}{\beta Q - F - I}$ ,  $y^* = \frac{C_2}{F + I + Z + \alpha R + \lambda V}$ 。雅可比矩阵为:

$$= 0, \text{故在 } [0, 1] \text{ 区间内其不是系统的 ESS。其余均衡点的 DetJ 和 TrJ 见表 3。}$$

表3 局部均衡点的特征值

均衡点	Det(J)	Tr(J)
O(0,0)	$C_2(C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})$	$-C_2 - (C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})$
A(1,0)	$C_2[(\beta Q - F - I) - (C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})]$	$C_2 + [(\beta Q - F - I) - (C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})]$
C(0,1)	$[(\alpha R + Z + I + F + \lambda V) - C_2](C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})$	$[(\alpha R + Z + I + F + \lambda V) - C_2] + (C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})$
B(1,1)	$[(\alpha R + Z + I + F + \lambda V) - C_2][(\beta Q - F - I) - (C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})]$	$-[(\alpha R + Z + I + F + \lambda V) - C_2][(\beta Q - F - I) - (C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})]$

3.2 模型局部稳定性分析

由表3可知,收益变量取值不同,DetJ和TrJ的正负号可能不同。其正负号取决于  $(C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})$  (条件1)、 $(\beta Q - F - I) - (C_1 + C_{bw} - M - F - C_{CS})$  (条件2)和  $(\alpha R + Z + I + F + \lambda V) - C_2$  (条件3)的符号判定。条件1是施工企业消极治理时,地方政府采用传统监

管与 B-OCEM 平台监管的收益差值;条件2代表施工企业积极治理时,地方政府采用 B-OCEM 平台监管与传统监管的收益差值;条件3为地方政府采用 B-OCEM 平台监管时,施工企业积极治理与消极治理的收益差值。上述条件所形成的情景及其均衡点稳定性见表4。

表4 不同情景中均衡点的稳定性分析

均衡点	Det(J)	Tr(J)	稳定性									
	情景1			情景2			情景3			情景4		
O(0,0)	-	-	鞍点	+	-	ESS	-	不定	鞍点	+	-	ESS
A(1,0)	+	+	不稳定	+	+	不稳定	-	不定	鞍点	-	不定	鞍点
C(0,1)	-	不定	鞍点	+	+	不稳定	-	不定	鞍点	-	不定	鞍点
B(1,1)	+	-	ESS	+	-	ESS	-	不定	鞍点	-	不定	鞍点
	情景5			情景6			情景7			情景8		
O(0,0)	-	不定	鞍点	+	-	ESS	-	不定	鞍点	+	-	ESS
A(1,0)	+	+	不稳定	+	+	不稳定	-	不定	鞍点	-	不定	鞍点
C(0,1)	+	-	ESS	-	不定	鞍点	+	-	ESS	-	不定	鞍点
B(1,1)	-	不定	鞍点	-	不定	鞍点	+	不定	鞍点	+	不定	鞍点

情景1:当条件1 < 0 且条件3 > 0 时,即地方政府采用 B-OCEM 平台监管的收益大于传统监管,且 B-

OCEM 平台监管模式下施工企业积极治理的收益大于消极治理。此时系统 ESS 为 B(1,1),即施工企业积极

治理,地方政府采用B-OCEM平台监管。

情景2:当条件1>0,条件2>0,条件3>0时,即地方政府采用B-OCEM平台监管时,施工企业积极治理的收益大于消极治理;施工企业积极治理时,地方政府采用B-OCEM平台监管的收益大于传统监管;施工企业消极治理时,地方政府采用B-OCEM平台监管的收益小于传统监管。此时系统有B(1,1)和O(0,0)两个ESS。

情景3:当条件1<0,条件2<0,条件3>0时,系统无ESS。

情景4:当条件1>0,条件2<0,条件3>0时,系统ESS为O(0,0),即施工企业消极治理,地方政府采用传统监管。

情景5:当条件1<0,条件2>0,条件3<0时,系统ESS为C(0,1),即施工企业消极治理,地方政府采用B-OCEM平台监管。

情景6:当条件1>0,条件2>0,条件3<0时,系统ESS为O(0,0)。

情景7:当条件1<0,条件2<0,条件3<0时,系统ESS为C(0,1)。

情景8:当条件1>0,条件2<0,条件3<0时,系统ESS为O(0,0)。

上述情景中,仅情景2存在(1,1)和(0,0)两种ESS,其中(1,1)是系统最理想的稳定状态,(0,0)是最不理想且在B-OCEM平台推行初期极易出现的稳定状态。为提高治理效果,需促使系统向(1,1)演化,故选取情景2为研究对象,分析各因素对协同治理策略选择的影响。

### 3.3 影响系统稳定性的主要因素

情景2的系统演化轨迹见图5。若施工企业和地方政府的初始策略位于ADCB区域,系统向点B(1,1)收敛,若初始策略位于ADCO区域,系统向点O(0,0)收敛。ADCB区域的面积 $S_{ADCB}$ 和ADCO区域的面积 $S_{ADCO}$ 决定系统的稳定状态,其中 $S_{ADCO} = \frac{1}{2} \left( \frac{C_1 + C_{bw} - C_{CS} - F - M}{\beta Q - F - I} + \frac{C_2}{F + I + Z + \alpha R + V\lambda} \right)$ ,  $S_{ADCB} = 1 - S_{ADCO}$ 。

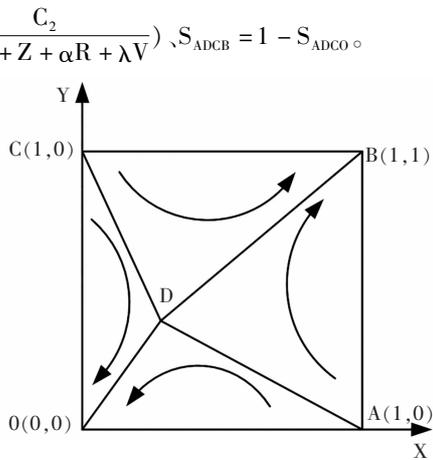


图5 施工企业-地方政府演化稳定相位图

影响 $S_{ADCO}$ 的因素有 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_{bw}$ 、 $C_{CS}$ 、 $F$ 、 $M$ 、 $Q$ 、 $I$ 、 $Z$ 、 $R$ 、 $V$ 、 $\alpha$ 、 $\lambda$ 和 $\beta$ 。通过对各影响因素求偏导,得到结论:

(1)施工污染罚金增量 $F$ 对 $S_{ADCO}$ 的影响:

$$\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial F} = \frac{1}{2} \left( \frac{-(\beta Q - F - I - (C_1 + C_{bw} - F - M - C_{CS}))}{(\beta Q - F - I)^2} + \frac{-C_2}{(F + I + Z + R\alpha + V\lambda)^2} \right)$$

当 $\beta Q - I - C_1 - C_{bw} + M + C_{CS} < -\frac{C_2(\beta Q - F - I)^2}{(F + I + Z + R\alpha + V\lambda)^2}$ 时, $\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial F} > 0$ ,即随着 $F$ 的增加, $S_{ADCO}$ 减小,双方趋于(积极治理,B-OCEM平台监管)。反之, $\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial F} < 0$ ,双方趋于(消极治理,传统监管)。

(2)绿色补贴增量 $I$ 对 $S_{ADCO}$ 的影响:

$$\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial I} = \frac{1}{2} \left[ \frac{C_1 + C_{bw} - C_{CS} - F - M}{(F + I - Q\beta)^2} - \frac{C_2}{(F + I + Z + R\alpha + V\lambda)^2} \right]$$

当 $C_1 + C_{bw} - C_{CS} - F - M > \frac{c_2(F + I - Q\beta)^2}{(F + I + Z + R\alpha + V\lambda)^2}$ 时, $\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial I} > 0$ ,随着 $I$ 的增加, $S_{ADCO}$ 减小,双方趋于(积极治理,B-OCEM平台监管)。反之, $\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial I} < 0$ ,双方趋于(消极治理,传统监管)。

(3)潜在收益系数 $\alpha$ 和潜在损失系数 $\lambda$ 对 $S_{ADCO}$ 的影响:

$$\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial \alpha} = -\frac{RC_2}{2(F + I + Z + R\alpha + V\lambda)^2} < 0$$

$$\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial \lambda} = -\frac{VC_2}{2(F + I + Z + R\alpha + V\lambda)^2} < 0$$

随着 $\alpha$ 、 $\lambda$ 的增加, $S_{ADCO}$ 减小,双方趋于(积极治理,B-OCEM平台监管)。

(4)施工企业增效收益 $Z$ 对 $S_{ADCO}$ 的影响:

$$\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial Z} = -\frac{C_2}{2(F + I + Z + R\alpha + V\lambda)^2} < 0$$

B-OCEM平台监管下,随着 $Z$ 的增加, $S_{ADCO}$ 减小,双方趋于(积极治理,B-OCEM平台监管)。

(5)增量成本 $C_1$ 和 $C_2$ 对 $S_{ADCO}$ 的影响:

$$\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial C_1} = \frac{1}{2(\beta Q - F - I)}$$

当 $\beta Q - F - I < 0$ 时, $\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial C_1} < 0$ ,随着地方政府采用B-OCEM平台监管的增量成本增加, $S_{ADCO}$ 减小,双方趋于(积极治理,B-OCEM平台监管)。反之, $\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial C_1} > 0$ ,双方趋于(消极治理,传统监管)。

$$\frac{\partial S_{ADCO}}{\partial C_2} = \frac{1}{2(F + I + Z + R\alpha + V\lambda)} > 0$$

随着施工企业积极治理的增量成本增加, $S_{ADCO}$ 增大,双方趋于(消极治理,传统监管)。

综上所述,不同约束条件下,同一因素的影响机理

不同,且各因素的影响程度不同,需对系统演化路径进行数值模拟。

#### 4 演化仿真分析

通过 Matlab 模拟双方策略选择的演化路径,进一步分析关键因素对演化结果的影响。根据《深圳市建筑废弃物管理办法》第六条得到潜在损失  $V$  大于潜在收益  $R$ ;参考相关研究得到平台监管下施工污染罚金增量  $F$  大于补贴增量  $I^{[22]}$ ,且政府采纳  $B-OCEM$  平台监管的增量成本  $C_1$  大于施工企业积极治理的增量成本  $C_2^{[8]}$ 。基于上述参数关系和赋值条件(条件 1、2、3 > 0),初步确定参数取值并通过专家访谈,最终确定参数取值为: $C_{CS}=3, C_{bw}=2, Z=3, M=3, (\alpha=0.5, \lambda=0.5, \beta=0.7,$

$Q=10, C_1=7, C_2=3, F=2, I=1, R=2, V=4$ 。

#### 4.1 施工污染罚金增量 $F$ 对演化结果的影响

令  $F=0.5, 2.5, 4$ ,其他参数不变, $F$  对系统演化路径的影响见图 6。当  $F$  较小时,系统存在(消极治理,传统监管)和(积极治理,  $B-OCEM$  平台监管)两种稳定策略;随着  $F$  增大,地方政府对施工企业消极治理的约束增强,施工企业基于自身利益最大化的目标逐步选择积极治理,此时选择(积极治理,  $B-OCEM$  平台监管)策略的比例增大;当  $F$  继续增大,施工企业消极治理的收益无法弥补高额的施工污染罚金,地方政府的罚金收益远大于传统监管模式,双方的稳定策略趋于(积极治理,  $B-OCEM$  平台监管)。

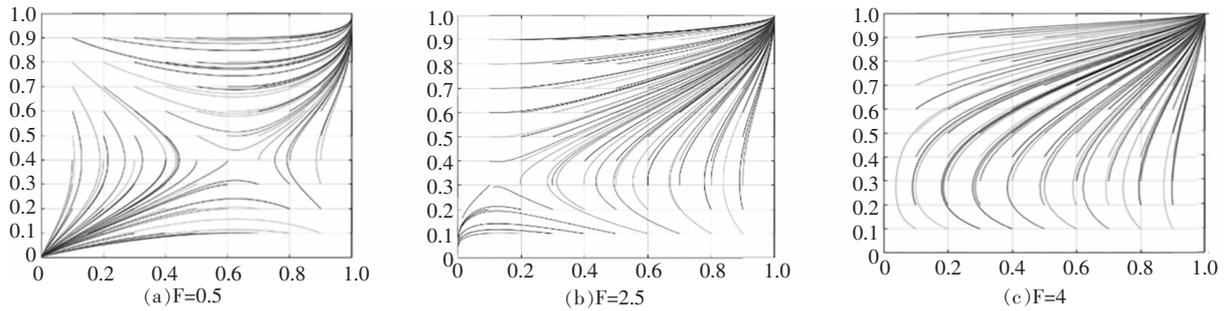


图 6 施工污染罚金增量  $F$  变化下施工企业-地方政府策略选择演化图

为深入分析惩罚措施对施工企业的激励作用,考虑  $B-OCEM$  平台推广初期地方政府选择  $B-OCEM$  平台监管,施工企业选择积极治理比例较低的事实,将  $x=0.25, y=0.25$  作为基准情景,此时  $F$  对博弈主体策略选择的影响见图 7。结果表明,施工污染罚金增量存在临界值;当  $F$  小于临界值,施工企业积极治理的动力不足,仍然选择消极治理的策略;当  $F$  大于临界值,其对施工企业消极治理约束作用增强,施工企业的策略选择由消极治理向积极治理演化,且  $F$  越大,收敛速度越快。故地方政府可通过制定合理的惩罚措施,保证施工企业消极治理的罚金大于临界值,抑制施工企业消极治理行为,促进协同治理模式的发展。

稳定状态,但存在演化速度缓慢的情况(如  $F=2.5$ ),故需进一步研究奖励措施对稳定策略收敛速度的影响。当  $F=2.5, I \in (-5.5, 4)$  且其他参数不变时, $I$  变化对博弈主体策略选择的影响见图 8。结果表明,与传统监管模式相比,地方政府若大幅度增加绿色补贴会加重其采纳  $B-OCEM$  平台监管模式的支出( $I=1, 2$ ),若大幅度减少绿色补贴会降低施工企业积极治理的激励收益( $I=-2, -3$ ),均会导致(传统监管模式、消极治理)的不理想策略;地方政府只有在一定范围内调整绿色补贴增量才能最终实现协同治理状态,即  $I \in (-1, 1)$ 。故当直接惩罚措施一定时,地方政府需要设置合理范围内的绿色补贴,激励施工企业积极治理。

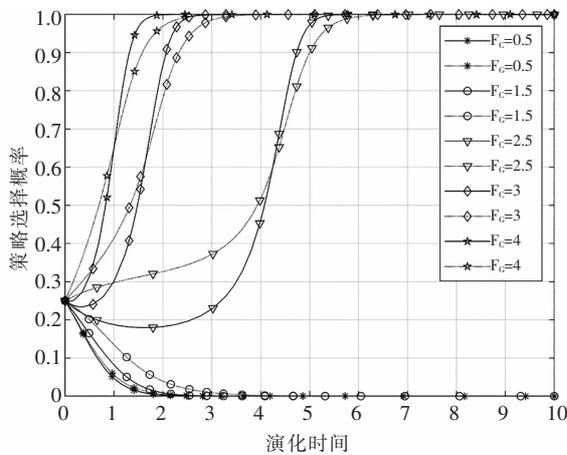


图 7 施工污染罚金增量  $F$  对系统演化路径的影响

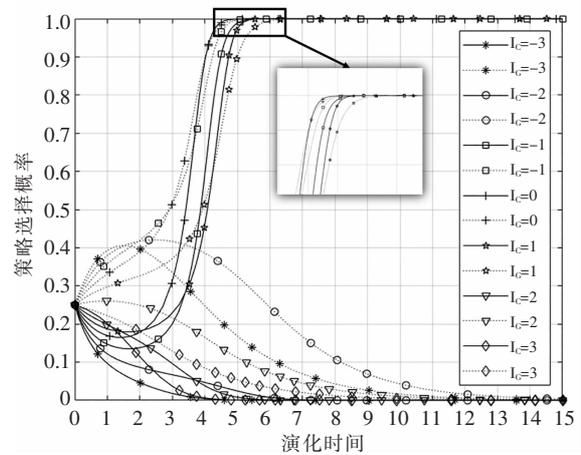


图 8 绿色补贴增量  $I$  对系统演化路径的影响

#### 4.2 绿色补贴增量 $I$ 对演化结果的影响

地方政府可以通过调整惩罚力度实现协同治理的

进一步分析绿色增量补贴在合理范围内变化对协同治理模式的影响。由图 8 可知,绿色补贴保持不变( $I$

=0)或适当减少( $I = -1$ ),反而更有利于快速达到协同治理状态。当直接惩罚措施适中时,适度减少或不改变绿色补贴更能反映企业的实际治理成本 and 市场需求,有利于实现环境治理目标并提高企业的社会责任感。若绿色补贴过高,可能会导致市场扭曲,存在企业为获得高额补贴而进行治理投入,并非出于环保意识和长期利益考虑。故在B-OCEM平台监管模式推广初期,地方政府需要设置合理的绿色补贴,避免“补贴额度越大越好”的误区。

#### 4.3 潜在收益和损失转化系数 $\alpha$ 、 $\lambda$ 对演化结果的影响

为探究间接激励措施对施工企业策略选择的影响,令 $\alpha = 0.3, 0.6, 0.9, \lambda = 0.3, 0.6, 0.9$ ,其他参数不变, $\alpha$ 和 $\lambda$ 对施工企业策略选择的影响见图9。结果表明,随着 $\alpha$ 和 $\lambda$ 的增大,施工企业选择积极治理的收益和消极治理的损失增大,最终收敛于积极治理;但随着 $\alpha$ 和 $\lambda$ 的增加,收敛速度逐渐减小;当 $\lambda$ 增加时,施工企业向积极治理收敛的速率更快,表明施工企业对潜在损失比潜在收益更加敏感。因此,地方政府需要利用B-OCEM平台内存储的数据,尤其注重应用施工企业消极治理相关数据,通过合理的间接激励措施提高施工企业积极治理的内在动力。

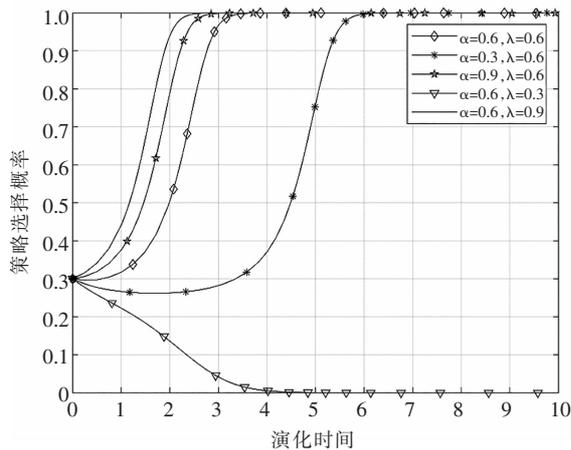


图9  $\alpha, \lambda$ 对施工企业演化路径的影响

#### 4.4 施工企业增效收益Z对演化结果的影响

增效收益对系统演化趋势的影响如图10所示,其中 $Z = 1, 3, 5$ ,其他参数不变。由图10可知,当Z大于临界值时,其可以弥补施工企业积极治理的增量成本,施工企业将主动选择积极治理,此时系统趋于理想稳定策略(积极治理, B-OCEM平台监管),且Z的增加提高收敛速度。因此,地方政府需制定合理的B-OCEM平台开发方案,持续维护和更新平台的功能,为施工企业带来更多收益,实现协同治理模式的可持续发展。

#### 4.5 增量成本对演化结果的影响

探究协同治理增量成本对系统演化路径的影响,地方政府的增量成本 $C_1$ 、施工企业的增量成本 $C_2$ 对系统演化稳定的影响如图11、12所示。较高的技术开发成本削弱地方政府采取B-OCEM平台监管的动力,最终系统的稳定策略趋于(消极治理,传统监管),随着 $C_1$ 降低,系统的演化稳定策略向最优理想稳定状态演变,且 $C_1$ 越小,系统的演化速度越快,如图11所示。故地方政

府在推广基于区块链的协同治理模式初期,需有效控制平台监管的增量成本。

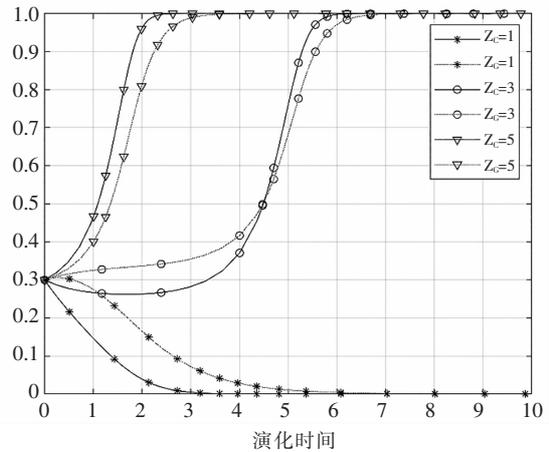


图10 增效收益Z对演化路径的影响

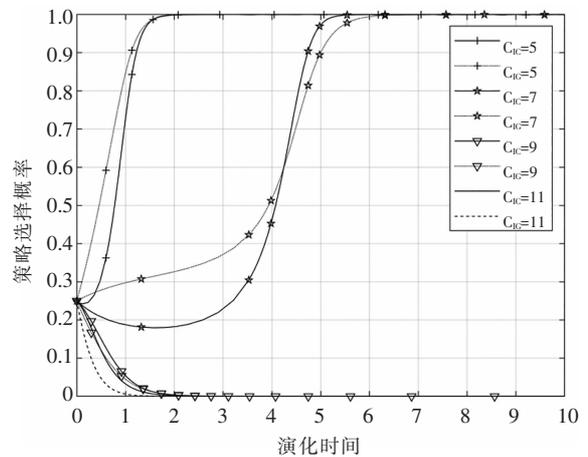


图11 B-OCEM平台监管增量成本对演化路径的影响

由图12可知, $C_2$ 对实现协同治理模式具有负向影响,较高的治理成本降低施工企业采取积极治理的收益,故地方政府需鼓励企业通过技术创新等途径降低施工环境污染的治理成本,并实施激励措施弥补施工企业积极治理的增量成本。

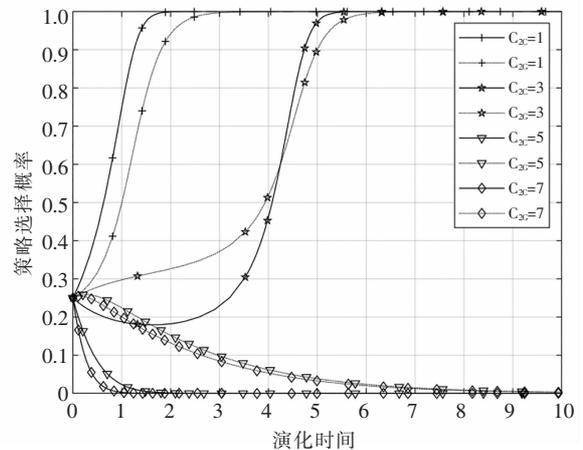


图12 积极治理增量成本对演化路径的影响

## 5 结论与启示

鉴于区块链应对施工现场环境污染治理困境的优势,提出以B-OCEM平台为载体的地方政府与施工企业协同治理新模式,构建演化博弈模型,探究区块链赋能和激励措施对治理主体的影响,得到以下结论和启示:

(1) 区块链的引入可解决传统模式中信息传递不及时、不完整的弊端,通过智能合约实现环境污染自动评价提高业务效率,为施工企业带来增效收益。因此,区块链赋能效果是决定系统演化稳定状态的关键因素,但需要关注区块链成本所产生的负向效应。

地方政府需把握技术赋能的新机遇,权衡区块链的成本和效益,制定详细的区块链开发方案,搭建B-OCEM平台以确保信息真实和完整,逐步向技术赋能的监管模式转型。

(2) 地方政府可以通过颁布奖惩等政策激励企业使用B-OCEM平台并积极治理。尽管罚金和补贴对提高环境治理效果起到正向作用,但本文发现:绿色补贴并非越多越好,而应该控制在一定的范围之内,在B-OCEM平台应用初期,地方政府保持绿色补贴不变或适当减少反而更有利于达到协同治理稳定状态。

地方政府需要充分发挥平台可追溯性对施工企业治理行为影响的优势,考虑技术赋能下惩罚政策的约束作用和奖励政策的激励作用的互补关系,动态调整惩罚和补贴力度,进而减轻其财政压力。

(3) 地方政府通过挖掘B-OCEM平台的价值,加强其引导作用。尽管研究表明施工企业潜在收益和损失越大,其选择积极治理策略的比例越高,但本文证明:潜在损失对施工企业行为的影响效果更为显著。因为潜在损失能够约束施工企业行为,使其按照既定法律法规进行污染治理,保障在中长期目标制定过程中充分考虑企业的社会责任感,故地方政府应更加注重利用平台中的施工企业消极治理相关数据强化潜在损失的影响,约束施工企业消极治理行为。

地方政府需要关注市场引导和技术应用的耦合效果,考虑施工企业对损失的高敏感性及收益的激励作用,加强消极治理数据的利用率,引导建筑行业可持续发展。

本文研究成果为地方政府推行区块链赋能的施工污染协同治理模式提供理论依据和实践建议,也为医疗等领域推广技术赋能的治理模式提供参考。在理论层面,构建施工企业和地方政府协同治理演化博弈模型,阐述技术赋能、地方政府直接和间接激励作用下治理主体策略选择的动态演化机制。在实践层面,通过模拟分析区块链赋能下地方政府如何发挥激励机制的正向效果并提出建议。本文研究方法侧重模型构建和数值模拟,未来将引入公众等其他利益相关主体,研究多主体参与下的施工污染治理决策。

## 参考文献:

- [1] 卢梅,黄钟. 建筑垃圾资源化产业链关键节点主体间的博弈分析[J]. 生态经济,2018,34(7):131-136.
- [2] Zhong B, Guo J, Zhang L, et al. A Blockchain - Based Framework For On - Site Construction Environmental Monitoring: Proof Of Concept[J]. Building and Environment, 2022, 217.
- [3] 邵志国,李梦笛,韩传峰,等. 基于演化博弈的建筑垃圾处理协同机制及仿真[J]. 中国管理科学,2022:1-14.
- [4] 王岭. 数字经济时代中国政府监管转型研究[J]. 管理世界, 2024,40(3):110-126+204+127.
- [5] 潘峰,王琳. 演化博弈视角下地方环境规制部门执法策略研究[J]. 管理工程学报,2020,34(3):65-73.
- [6] Yan X. Evolutionary Game Analysis of Engineering Construction Innovation and Local Government Environmental Regulation Strategy [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 768(3):032042.
- [7] 曹阳春,刘贻新,张光宇. 基于政府驱动的区块链产业协同创新演化博弈研究[J]. 软科学,2021,35(11):19-24+31.
- [8] 杨增科,樊瑞果,王一新,等. 基于演化博弈的政府与施工企业扬尘治理协同处理模式优化与选择[J]. 工程管理学报,2020, 34(4):45-50.
- [9] 朱红章,隋晓亮. 基于三方演化博弈的施工扬尘治理行为研究[J]. 粉煤灰综合利用,2021,35(6):115-120.
- [10] 何奇龙,唐娟红,罗兴,等. 政企农协同治理农业面源污染的演化博弈分析[J]. 中国管理科学,2023,31(7):202-213.
- [11] 秦书锋,熊勇清. “非补贴型”政策能否促进新能源汽车企业创新实现? ——基于SCP范式分析视角[J]. 科学学与科学技术管理,2024,45(5):3-23.
- [12] 王爱荣,郭晓林,何志星. 基于区块链的农产品溯源体系的演化博弈[J]. 物流技术,2022,41(1):70-75.
- [13] 任立肖,宋宣,张丽,等. 区块链视角下食品供应链多方演化博弈模型[J]. 食品与机械,2021,37(11):232-239.
- [14] 林艳,关瑜婷,孙淑红. 科技型企业应用区块链技术创新的影响因素及路径研究[J]. 软科学,2021,35(3):63-68.
- [15] 张令荣,彭博,程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. 中国管理科学,2023,31(10):49-60.
- [16] 彭正银,姚双双. 平台生态系统中平台企业与互补企业实现协同合作的路径研究——基于演化博弈分析[J]. 软科学,2023, 37(5):87-95+114.
- [17] 刘琪,汤百川,吴伟巍. 建设项目环境污染第三方监管平台价格结构研究[J]. 工程管理学报,2022,36(1):100-105.
- [18] 刘凤英. 基于利益相关者视角的高速公路绿色施工发展动力机制研究[D]. 重庆交通大学,2022.
- [19] Shojaei A, Ketabi R, Razkenari M, et al. Enabling a Circular Economy In The Built Environment Sector Through Blockchain Technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294.
- [20] 成全,董嘉鑫. 区块链技术采纳的政府公共信用数据供应链治理演化博弈研究[J]. 情报探索,2023(11):1-11.
- [21] 成连华,王晨,李树刚,等. 基于前景理论的建筑施工安全管理多主体演化博弈研究[J]. 安全与环境学报,2023,23(9):3286-3297.
- [22] 肖伟巍. 基于演化博弈理论的绿色施工激励机制研究[D]. 西安建筑科技大学,2019.

(责任编辑:秦颖)