Operations Research and Fuzziology 运筹与模糊学, 2025, 15(2), 562-578
Published Online April 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/orf
https://doi.org/10.12677/orf.2025.152106

Hans汉斯

基于PT-MA理论的高速铁路施工工人质量行为演化研究

刘家惠

同济大学经济与管理学院，上海

收稿日期：2025年3月6日；录用日期：2025年4月3日；发布日期：2025年4月11日

摘　要

高速铁路施工工人和施工单位质量管理人员的策略选择直接影响到高速铁路工程项目的施工质量。本文从前景理论和心理账户理论的角度出发，分析了施工单位质量管理人员和高速铁路施工工人的策略选择过程。通过构建成本账户和效价账户前景收益感知矩阵，深入分析了博弈双方行为决策的动态演化过程，探讨了不同情形下演化系统达到均衡状态需要满足的条件，解释了实际施工过程中系统策略演化不能达到理想状态的原因，并利用MATLAB软件对相关影响因素进行了仿真分析。研究表明：高速铁路施工工人质量行为受到多因素的影响，提高高速铁路施工工人的效价风险偏好系数、减小成本损失风险偏好系数以及降低质量合规行为成本有利于高速铁路施工工人行为策略向“质量合规行为”策略演化；提高施工单位质量管理人员选择积极管理策略的初始比例、降低积极管理成本、适当的奖励和处罚有利于高速铁路施工工人行为策略向“质量合规行为”策略演化。

关键词

施工工人，质量行为，演化博弈，前景理论，心理账户理论

Evolutionary Analysis of Quality Behavior of High-Speed Railway Construction Workers Based on PT-MA Theory

Jiahui Liu

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Mar. 6th, 2025; accepted: Apr. 3rd, 2025; published: Apr. 11th, 2025

Abstract

The strategic choices of high-speed railway construction workers and quality management

文章引用: 刘家惠. 基于 PT-MA 理论的高速铁路施工工人质量行为演化研究[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(2): 562-578.
DOI: 10.12677/orf.2025.152106

personnel directly impact the construction quality of high-speed railway projects. This study analyzes the decision-making process of the quality management personnel and the construction workers from the perspectives of Prospect Theory and Mental Accounting Theory. By constructing matrices of perceived gains for cost accounts and value accounts, this research delves into the dynamic evolution of decision-making behaviors of both parties in the game, explores the conditions required for the evolutionary system to reach an equilibrium state under different scenarios, and explains the reasons why the system's strategic evolution fails to achieve an ideal state in the actual construction process. MATLAB software is utilized to conduct simulations on relevant influencing factors. The research indicates that the quality behavior of high-speed railway construction workers is influenced by multiple factors. Increasing the utility risk preference coefficient of high-speed railway construction workers, reducing the cost loss risk preference coefficient, and reducing the cost of quality compliance behavior are conducive to the evolution of the workers' behavioral strategies towards quality compliance behavior. Additionally, raising the initial proportion of proactive management strategies chosen by the quality management personnel, decreasing the costs associated with proactive management, and implementing appropriate rewards and penalties are beneficial for the evolution of the construction workers' behavioral strategies towards quality compliance behavior.

Keywords

Construction Workers, Quality Behavior, Evolutionary Game, Prospect Theory, Mental Accounting Theory

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

近年来，我国高速铁路建设规模持续扩大，运营里程不断增加，已然成为世界高速铁路发展的引领者。然而，随着高速铁路建设规模持续扩大与施工环境日益复杂化，施工过程中的质量问题频繁出现，严重威胁到铁路的安全运营和人民的生命和财产安全。一些研究表明，人为因素是引发工程项目质量问题的主要要素[1]，在高速铁路施工过程中，约 80%的施工质量问题是施工工人的质量违规行为导致的[2]，施工工人常见的质量违规行为包括偷工减料、不按设计要求施工以及质量自检疏忽等。由此可见，对施工工人的质量行为进行有效管理是确保高速铁路工程施工质量的关键。在实际施工过程中，施工工人面临着各种不确定性和风险，如复杂的施工环境、工期压力以及严格的质量要求等，这些因素导致施工工人在进行质量行为决策时并非总是完全理性的，而是会受到心理因素和外部环境因素的交互影响。因此，深入理解高速铁路施工工人在不确定环境下的质量行为策略演化规律，对于提升高速铁路工程项目施工质量和确保铁路安全运营意义重大。

目前有关质量行为的研究主要集中在两类研究视角。一是通过实证分析探索质量行为的影响因素和作用机理，并在此基础上提出质量行为管理和控制的策略和措施，如黄超等[3]结合计划行为理论指出影响高速铁路施工工人质量行为的内在因素包括行为态度、主观规范和知觉行为控制，管理者可以通过制定质量奖惩制度和质量“四化”控制等方式改善施工工人的质量行为。实证研究方法通过数据收集和分析，为研究假设提供了直接的证据支持，能够较好地验证理论假设并探索质量行为的实际影响，然而这种基于静态的截面数据分析无法从质量行为管理和控制的动态微观机理进行定量分析且忽视了施工工人具有有限理性的特征。二是基于演化博弈的视角探索个体或组织的质量行为动态决策过

程。演化博弈理论假定主体仅具备有限理性和有限信息，且能描述行为演化的动态微观机理，在分析和预测复杂系统中的行为演化得到了广泛应用[4] [5]。目前关于质量行为的演化博弈研究大多聚焦在业主、设计方、监理方和施工单位等外部监管主体，如王佩茜[6]通过构建总承包商的质量行为激励模型，识别出成本、收益和风险规避是影响质量行为的关键因素；马海聘等[7]通过构建施工方、业主方和监理方的三方演化博弈模型分析得出加大惩罚力度和提升质量意识能够有效减少质量违规行为的产生；汪玉亭等[8]认为现行质量监管效率不高是导致工程建设中质量问题频发的主要原因，为了减少工程建设中的质量违规行为需要增强监管力度、奖惩力度以及提高主体的抗风险努力程度。然而，施工工人作为施工质量的“第一责任人”，其质量行为对施工质量具有决定性影响，现有研究对施工单位内部系统尤其是对施工工人管理的影响关注不足。此外，从演化博弈视角研究质量行为虽然实现了从质量行为管理和控制的动态微观机理进行定量分析，但是演化博弈的收益函数的确定是基于效用最大化原则，这与有限理性假设和现实情境存在较大偏差，无法准确解释施工工人在复杂施工环境下的行为策略选择。

前景理论和心理账户理论作为行为经济学中的重要理论，为解释和预测个体在不确定条件下的决策行为提供了新的视角。前景理论强调个体对收益和损失的非对称性感知以及对概率的非线性评估[9]。心理账户理论则关注个体在决策时如何将财富划分到不同的“账户”中[10]，并按照人对“获取回报”或“付出代价”感知的不同，将心理账户分为效价账户(得到回报)和成本账户(付出代价) [11]。目前前景理论和心理账户理论已广泛运用于行为演化的研究中，如陈艳等[12]从前景理论和心理账户理论视角分析了 PPP 项目中公共部门和私人部门风险管理行为演化。

鉴于此，本文将前景理论和心理账户理论结合应用于高速铁路施工工人的质量行为演化博弈研究中，弥补现有研究中对决策者有限理性特征的忽略以及修正期望效用理论对高速铁路施工工人质量行为的解释偏差，通过构建博弈双方收益感知矩阵，分析高速铁路施工工人质量行为演化的动态过程和系统策略选择达到稳定状态的条件。

2. 演化博弈模型构建

2.1. 问题描述

在高速铁路工程项目施工过程中，施工工人为了追求能效提升、节省时间及工作的舒适性，会抱有侥幸心理和投机心理，在施工时可能存在不按施工工艺和流程施工、偷工减料、违规操作机械设备以及省略施工步骤等质量违规行为。高速铁路施工工人的质量违规行为具有隐蔽性、动态性、社会性和差异性等特征[13]，可能会引起返工或质量事故的发生，影响高速铁路工程项目的施工质量，损害施工单位的利益。施工单位的质量管理人员作为项目的质量管理的核心主体，其职责包括施工技术交底、质量培训教育、施工过程质量监督与检查以及质量验收等工作。在业主方提出的“工程质量‘零缺陷’，检验批、分项、分部工程质量检验合格率 100%，单位工程一次验收合格率 100%”的高质量严格标准下，传统粗放式的质量管理方法已难以满足要求。在此背景下，施工单位质量管理人员有必要对施工工人的质量违规行为进行积极管理和控制，从而实现项目的质量目标。在不考虑高速铁路工程项目施工外部影响因素干扰的前提下，高速铁路工程项目施工过程中施工工人质量违规行为是否出现，可以被视为施工单位质量管理人员群体与施工工人群体博弈的结果。施工单位质量管理人员的激励惩罚和质量监督和检查等管理行为和施工工人的心理因素都会影响施工工人质量行为选择，施工工人的质量行为选择又会反馈给质量管理人员，促使其调整管理策略，这种双方基于对方行为和自身心理因素不断调整自身策略的过程，本质上是一种风险决策行为，是综合考虑心理因素的动态博弈过程，涉及博弈双方群体对收益、成本和风险进行综合考量的过程。

2.2. 模型假设和参数说明

本文提出了以下假设和参数设定。

假设 1：博弈主体。在高速铁路工程项目施工过程中，假设不考虑高速铁路工程项目施工系统外部影响因素干扰，高速铁路工程项目施工过程中施工工人质量违规行为是否出现，可以被视为施工单位质量管理人员群体与施工工人群体博弈的结果，据此假设施工单位内部质量管理博弈过程中只存在施工单位质量管理人员 [1] 和施工工人两类博弈群体，且由于高速铁路工程项目施工过程具有高度复杂性和不确定性[14]，施工单位质量管理人员和施工工人在工作职责、技术能力、质量知识、风险感知以及风险偏好等方面存在显著差异，均为具有学习能力和自适应能力的有限理性群体。两类博弈群体的策略选择主要取决于其对行为策略价值的感知而不是期望效用值的客观结果。价值感知可以使用前景理论构建的价值感知函数进行衡量：$V=\sum\pi(p_i)v(\Delta x_i)$ [15] [16]，其中 V 为整体价值感知，$v(\Delta x_i)$ 是价值判断函数，$\pi(p_i)$ 是决策权重函数。心理账户理论进一步对价值判断函数做了划分，当价值感知为“获得”时，$v(\Delta x_i)$ 划分到效价账户的价值判断函数 $V(x)$，当价值感知为“失去”时，$v(\Delta x_i)$ 划分到成本账户的价值判断函数 $Z(x)$。以决策权重函数代替事件发生的客观概率，以成本账户价值判断函数和效价账户价值判断函数代替期望效用函数，能够更现实地反映施工工人质量行为决策的过程。$V(x)$、$Z(x)$ 和决策权重函数的表达式如下：

(1) 效价账户的价值感知函数 $V(x)$

$$V(x)=\begin{cases}(x-x_0)^{\alpha}, & x\ge x_0\\ -\lambda(x_0-x)^{\beta}, & x<x_0\end{cases} \tag{1}$$

其中 $V(x)$ 表示效价账户的价值感知函数，λ 表示效价损失规避系数，x_0 表示效价参照点，x 表示价值变量，β、α 表示效价风险厌恶系数[11]。

(2) 成本账户的价值感知函数 $Z(x)$

$$Z(x)=\begin{cases}\delta(x-x_1)^{\mu}, & x\ge x_1\\ -(x_1-x)^{\sigma}, & x<x_1\end{cases} \tag{2}$$

其中 $Z(x)$ 表示成本账户的价值感知函数，μ 和 σ 表示成本风险偏好系数[11]，δ 表示成本损失规避系数，x_1 表示成本参照点。

(3) 决策权重函数

$$\pi^{+}(p)=\frac{p^{\gamma}}{\left[p^{\gamma}+(1-p)^{\gamma}\right]^{\frac{1}{\gamma}}} \tag{3}$$

$$\pi^{-}(p)=\frac{p^{\xi}}{\left[p^{\xi}+(1-p)^{\xi}\right]^{\frac{1}{\xi}}} \tag{4}$$

其中，$\pi^{+}(p)$ 和 $\pi^{-}(p)$ 分别表示决策者面对收益和损失时的决策权重函数；γ 和 ξ 表示决策影响系数，p_i 表示事件 i 发生的客观概率，当 p_i 较小时，$\pi(p_i)>p_i$，当 p_i 较大时，$\pi(p_i)<p_i$。在本文中不区分 $\pi^{+}(p)$、$\pi^{-}(p)$，统一用 $\pi(p)$ 表示。

[1] 和劳务分包管理模式不同，高速铁路工程项目采用的是架子队管理模式，施工现场的质量管理人员均来自施工单位，施工单位质量管理人员和施工工人同属施工单位质量责任主体，形成封闭的质量责任体系。

假设 2：策略选择。施工工人群体的策略空间为$W=\{W_1,W_2\}$ = {质量合规行为，质量违规行为}，施工工人的质量合规行为具体表现为遵守施工规范和标准、使用合格的材料和设备、严格按照工程设计图纸和施工技术标准进行施工等，施工工人选择质量违规行为具体表现为不按设计要求施工、偷工减料以及简化对施工质量有影响的工序等，x 和$1-x$分别表示施工工人群体中选择W_1和W_2的比例，$0\le x\le 1$；施工单位质量管理人员群体的策略空间为$M=\{M_1,M_2\}$ = {积极管理，消极管理}，施工单位质量管理人员积极管理主要表现为积极开展质量教育培训、施工技术交底、过程质量监督与检查以及质量验收等工作，施工单位质量管理人员消极管理主要表现为开展质量教育培训、施工技术交底、过程质量监督与检查以及质量验收等工作流于形式，y和$1-y$分别表示施工单位质量管理人员群体中选择M_1和M_2的比例。

假设 3：施工单位质量管理人员收益和成本。H_1、H_2表示施工单位质量管理人员选择积极管理和消极管理的管理成本，$H_1>H_2$，施工单位质量管理人员进行管理可获得的工资薪酬为D_1，施工单位质量管理人员积极管理能获得项目质量绩效提升带来的额外奖励为D_2，包括直接经济收益和质量验收通过、声誉提升。

假设 4：施工工人收益和成本。施工工人完成施工任务可得到工资薪酬I，C_1、C_2分别表示施工工人选择质量合规行为和质量违规行为的操作成本，$C_1>C_2$，若施工单位质量管理人员选择积极管理，施工工人选择质量合规行为可额外获得奖励 R，施工工人选择质量违规行为可能会被发现而处罚 F，被发现的概率为θ，质量违规行为未被发现时，施工工人可保留工资薪酬并节省成本C_1-C_2。

假设 5：能力互补效应。两类博弈群体的能力存在互补效应，即当博弈双方选择$\{W_1,M_1\}$策略时，高速铁路工程项目施工质量最佳，此时假设质量风险成本为 0；当博弈双方选择$\{W_2,M_2\}$策略时，高速铁路工程项目施工质量最差；当博弈双方选择$\{W_1,M_2\}$或$\{W_2,M_1\}$策略时，高速铁路工程项目施工质量处于中等水平。

假设 6：风险共担。当仅有一方或双方都不重视施工质量时，项目可能会出现施工质量问题，此时施工工人和施工单位质量管理人员都要承担相应的质量风险成本，且双方承担的质量风险成本线性相关，当施工单位质量管理人员消极管理和施工工人选择质量违规行为时，施工质量问题出现的概率为p_0，Q为施工单位质量管理人员消极管理和施工工人选择质量违规行为时施工工人需要承担的质量风险成本，包括经济损失和人身伤害等质量风险成本；E为施工单位质量管理人员积极管理且施工工人选择质量违规行为时，双方需要承担的质量风险成本的折扣系数；G 为施工单位质量管理人员消极管理且施工工人选择质量合规行为时，双方需要承担的质量风险成本的折扣系数；h为风险传递系数，即若高速铁路施工工人承担的质量风险成本为Q，则施工单位质量管理人员承担的质量风险成本为hQ，以此类推[17]。

2.3. 博弈模型分析

2.3.1. 收益感知矩阵构建

博弈过程中不同策略组合情形下的效用函数可用收益函数替代，而前景理论和心理账户理论根据主体对“失去”和“获得”的不同感知，将主体决策的收益划分为表示“付出代价”感知的成本函数和“获得回报”感知的效价函数[18]，成本函数和效价函数可视为价值函数在不同感知情境下的两种具体表现形式，结合上述假设，使用价值判断函数修正传统收益函数，将成本和损失等“付出代价”感知的收益函数用成本函数修正，将收入等“获得回报”感知的收益函数用效价函数修正，据此得到高速铁路施工工人和施工单位质量管理人员博弈的收益感知矩阵如表 1，其中各主体收益感知以收入感知与成本感知之差为原则[19]。

Table 1. Revenue perception matrix
表 1. 收益感知矩阵

施工单位质量管理人员	高速铁路施工工人	
	质量合规行为(x)	质量违规行为($1-x$)
积极管理(y)	$V(D_1+D_2)-Z(H_1)$， $V(I+R)-Z(C_1)$	$V(D_1+D_2+\pi(\theta)F)-Z(H_1+hEQ\pi(p_0))$， $V(I)-Z(C_2+\pi(\theta)F+EQ\pi(p_0))$
消极管理 ($1-y$)	$V(D_1)-Z(H_2+hGQ\pi(p_0))$， $V(I)-Z(C_1+GQ\pi(p_0))$	$V(D_1)-Z(H_2+hQ\pi(p_0))$， $V(I)-Z(C_2+Q\pi(p_0))$

其中 H_1、H_2、Q、C_1、C_2、F 属于成本账户价值感知函数 $Z(x)$，D_1、D_2、I、R 属于效价账户价值感知函数 $V(x)$。

2.3.2. 期望收益函数构建

根据表 1，x 和 y 是事件发生的客观概率，在实际施工过程中，由于施工工人和施工单位质量管理人员省能心理和侥幸心理的存在，双方在面临“失去”和“获得”的选择时具有有限理性的特征，其决策权重往往不和事件发生的客观概率一致，根据前景理论，使用决策权重函数代替事件发生的客观概率，用价值函数修正收益函数[18]，可以计算施工单位质量管理人员积极管理和消极管理的价值感知 U_{MY} 和 U_{MN} 以及平均价值感知 U_M，如下所示。

$$U_{MY}=\pi(x)\left[V(D_1+D_2)-Z(H_1)\right]+\pi(1-x)\left[V(D_1+D_2+\pi(\theta)F)-Z(H_1+hEQ\pi(p_0))\right] \tag{5}$$

$$U_{MN}=\pi(x)\left[V(D_1)-Z(H_2+hGQ\pi(p_0))\right]+\pi(1-x)\left[V(D_1)-Z(H_2+hQ\pi(p_0))\right] \tag{6}$$

$$U_M=yU_{MY}+(1-y)U_{MN} \tag{7}$$

同理可以计算高速铁路施工工人选择质量合规行为和质量违规行为的价值感知 U_{WY} 和 U_{WN} 以及平均价值感知 U_W，如下所示。

$$U_{WY}=\pi(y)\left[V(I+R)-Z(C_1)\right]+\pi(1-y)\left[V(I)-Z(C_1+GQ\pi(p_0))\right] \tag{8}$$

$$U_{WN}=\pi(y)\left[V(I)-Z(C_2+\pi(\theta)F+EQ\pi(p_0))\right]+\pi(1-y)\left[V(I)-Z(C_2+Q\pi(p_0))\right] \tag{9}$$

$$U_W=xU_{WY}+(1-x)U_{WN} \tag{10}$$

2.4. 演化稳定均衡分析

2.4.1. 复制动态方程

为了简化运算，首先引入 M、N、L、O 四个表达式，M 和 N 分别表示施工工人选择质量合规行为和质量违规行为时，施工单位质量管理人员积极管理价值感知函数与消极管理价值感知函数的差值，L 和 O 分别表示施工单位质量管理人员积极管理时和消极管理时，施工工人选择质量合规行为价值感知函数与质量违规行为的价值感知函数的差值，具体表达式如下。

$$M=V(D_1+D_2)-Z(H_1)-V(D_1)+Z(H_2+hGQ\pi(p_0)) \tag{11}$$

$$N=V(D_1+D_2+\pi(\theta)F)-Z(H_1+hEQ\pi(p_0))-V(D_1)+Z(H_2+hQ\pi(p_0)) \tag{12}$$

$$L = V(I+R) - Z(C_1) - V(I) + Z\left(C_2 + \pi(\theta)F + EQ\pi(p_0)\right) \tag{13}$$

$$O = -Z\left(C_1 + GQ\pi(p_0)\right) + Z\left(C_2 + Q\pi(p_0)\right) \tag{14}$$

在演化博弈论中，复制动态方程是用于刻画特定策略在群体中的采用频率随时间变化情况的动态微分方程[20]，施工单位管理人员选择积极管理的复制动态方程 $G(y)$ 和施工工人选择质量合规行为的复制动态方程 $F(x)$ 如下。

$$F(x) = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = x\left(U_{WY} - U_W\right) = x(1-x)\left[\pi(y)M + \pi(1-y)N\right] \tag{15}$$

$$G(y) = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = y\left(U_{MY} - U_M\right) = y(1-y)\left[\pi(x)L + \pi(1-x)O\right] \tag{16}$$

根据微分方程的稳定性原理，令 $F(x)=0$ 和 $G(y)=0$ 可以得到演化博弈系统的四个局部均衡点 $A_1(0,0)$，$A_2(0,1)$，$A_3(1,0)$，$A_4(1,1)$，四个点均为纯策略均衡解，混合策略均衡点 $A_5(x^*, y^*)$ 是否存在需要逐一判断，要使得 x^*、y^* 有解，根据概率权重函数可知 M、N、L、O 必须满足 $MN<0$ 且 $LO<0$，此时 x^*、y^* 的值如下：

$$x^* = \frac{\left(\frac{-O}{L}\right)^{\frac{1}{\gamma}}}{1+\left(\frac{-O}{L}\right)^{\frac{1}{\gamma}}},\quad y^* = \frac{\left(\frac{-N}{M}\right)^{\frac{1}{\gamma}}}{1+\left(\frac{-N}{M}\right)^{\frac{1}{\gamma}}} \tag{17}$$

否则 x^*、y^* 不存在。

2.4.2. 系统均衡点稳定性分析

基于演化博弈理论可知，复制动态方程得到的局部均衡点不一定是系统演化稳定点，还需要满足均衡点对于任何细微的扰动都具有稳定性的要求，根据 Freidman 提出的系统演化稳定策略推导方法，微分方程系统的演化稳定策略(Evolutionary Stabilization Strategy, ESS)可由该系统的雅可比矩阵(Jacobian)的局部稳定性分析得到[21]，上述复制动态方程组可以写出雅可比矩阵的形式，即式(18)。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial G(y)}{\partial x} & \frac{\partial G(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2x)\left[\pi(y)M + \pi(1-y)N\right] & \left(x-x^2\right)\left[\frac{\mathrm{d}\pi(y)}{\mathrm{d}y}M - \frac{\mathrm{d}\pi(1-y)}{\mathrm{d}y}N\right] \\ \left(y-y^2\right)\left[\frac{\mathrm{d}\pi(x)}{\mathrm{d}x}L - \frac{\mathrm{d}\pi(1-x)}{\mathrm{d}x}O\right] & (1-2y)\left[\pi(x)L + \pi(1-x)O\right] \end{bmatrix} \tag{18}$$

根据雅可比矩阵的行列式($\det J$)和迹($tr\ J$)的符号可以判断均衡点是否为演化稳定策略：如果 $\det J>0$ 和 $tr\ J<0$ 同时满足，则对应的均衡点是演化稳定均衡点，对应的博弈双方策略是博弈系统的 ESS，$\det J$ 和 $tr\ J$ 表达式如下。

$$\begin{aligned} \det J &= \frac{\partial F(x)}{\partial x}\frac{\partial G(y)}{\partial y} - \frac{\partial G(y)}{\partial x}\frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ &= (1-2x)(1-2y)\left[\pi(y)M + \pi(1-y)N\right]\left[\pi(x)L + \pi(1-x)O\right] \\ &\quad -\left(x-x^2\right)\left(y-y^2\right)\left[\frac{\mathrm{d}\pi(y)}{\mathrm{d}y}M - \frac{\mathrm{d}\pi(1-y)}{\mathrm{d}y}N\right]\left[\frac{\mathrm{d}\pi(x)}{\mathrm{d}x}L - \frac{\mathrm{d}\pi(1-x)}{\mathrm{d}x}O\right] \end{aligned} \tag{19}$$

$$tr\ J=\frac{\partial F(x)}{\partial x}+\frac{\partial G(y)}{\partial y}=(1-2x)\left[\pi(y)M+\pi(1-y)N\right]+(1-2y)\left[\pi(x)L+\pi(1-x)O\right] \tag{20}$$

当 $MN<0$ 且 $LO<0$ 时，此时均衡点 $A_5(x^*,y^*)$ 存在，迹为 0，此时使用雅可比矩阵判断稳定点的方法失效，利用微分分析法对其稳定性进行判断[21]，对 $F(x)$ 和 $G(y)$ 求偏导，并把均衡点 $A_5(x^*,y^*)$ 代入，得到偏导数均大于 0，因此该点不是稳定点，这也与已有研究的结论“在非对称博弈中混合策略均衡点一定不是演化稳定均衡点”符合[22] [23]。计算出四个纯策略均衡点对应的雅可比矩阵的 det J 和 $tr\ J$，如表 2 所示。

Table 2. The determinant and the trace of the Jacobi matrix corresponding to each equilibrium point
表 2. 各均衡点对应雅可比矩阵的行列式和迹

均衡点	(0,0)	(0,1)	(1,0)	(1,1)
det J	NO	$-OM$	$-NL$	ML
$tr\ J$	$N+O$	$M-O$	$L-N$	$-M-L$

根据表 2 可知，系统演化稳定性会受到系数 M、N、L 和 O 的影响，据此分别讨论不同均衡点成为稳定点所需的条件。

情形 1：当 $N<0$，$O<0$ 且 $M<0$，$L<0$ 时，(0,0)是系统演化稳定点，即当施工单位质量管理人员选择积极管理的价值感知小于选择消极管理的价值感知时，且高速铁路施工工人选择质量合规行为的价值感知小于选择质量违规行为的价值感知时，{消极管理，质量违规行为}是系统演化稳定策略。

情形 2：当 $M<0$，$O>0$ 时，(0,1)是系统演化稳定点，即当施工单位质量管理人员选择积极管理的价值感知小于选择消极管理的价值感知时，且高速铁路施工工人选择质量合规行为的价值感知大于选择质量违规行为的价值感知时，{消极管理，质量合规行为}是系统演化稳定策略。

情形 3：当 $N>0$，$L<0$ 时，(1,0)是系统演化稳定点，即当施工单位质量管理人员选择积极管理的价值感知大于选择消极管理的价值感知时，且高速铁路施工工人选择质量合规行为的价值感知小于选择质量违规行为的价值感知时，{积极管理，质量违规行为}是系统演化稳定策略。

情形 4：当 $N>0$，$O>0$ 且 $M>0$，$L>0$ 时，(1,1)是系统演化稳定点，即当施工单位质量管理人员选择积极管理的价值感知大于选择消极管理的价值感知时，且高速铁路施工工人选择质量合规行为的价值感知大于选择质量违规行为的价值感知时，{积极管理，质量合规行为}是系统演化稳定策略，其也是系统演化的最理想状态。

2.4.3. 结果分析与讨论

在工程实践中，质量问题的出现往往会造成大量的资源浪费和财产损失，严重时还可能导致工期延误和人员伤亡[24]，且高速铁路工程项目施工质量的优劣直接关系到后续铁路投入运营的安全性与稳定性。施工人员作为引起高速铁路施工质量问题的关键要素，只有施工单位质量管理人员和高速铁路施工工人都重视施工质量，最大程度地减少施工质量风险，整个系统才能达到质量最优状态，对应于系统演化的最理想状态{积极管理，质量合规行为}，具体满足的条件如下：

$$V(I+R)-Z(C_1)-V(I)+Z\left(C_2+\pi(\theta)F+EQ\pi(p_0)\right)>0 \tag{21}$$

$$Z\left(C_1+GQ\pi(p_0)\right)<Z\left(C_2+Q\pi(p_0)\right) \tag{22}$$

$$V(D_1+D_2)-Z(H_1)-V(D_1)+Z\left(H_2+hGQ\pi(p_0)\right)>0 \tag{23}$$

$$V\left(D_1+D_2+\pi(\theta)F\right)-Z\left(H_1+hEQ\pi\left(p_0\right)\right)-V\left(D_1\right)+Z\left(H_2+hQ\pi\left(p_0\right)\right)>0 \tag{24}$$

由于成本价值感知函数和效价价值感知函数均为增函数，可以推知：约束条件 1 表明在施工单位质量管理人员积极管理下，施工工人选择质量合规行为和质量违规行为的感知收益差应大于选择质量合规行为的感知操作成本和质量违规行为的感知操作成本、罚款以及质量风险成本之差，所以当 R 较小和 F 较大时，均不利于系统达到理想状态；约束条件 2 表明施工工人选择质量合规行为和质量行为违规行为的感知操作成本之差不应超过施工单位质量管理人员消极管理下施工工人选择质量合规行为与质量违规行为需要承担的感知质量风险成本差，所以当 C_1 较大而 C_2 较小时，不利于系统达到理想状态；约束条件 3 和 4 表明，无论施工工人选择质量合规行为还是质量违规行为，施工单位质量管理人员积极管理和消极管理的感知收益差应大于积极管理的感知管理成本与消极管理的感知成本以及需要承担的质量风险成本之差，所以当 D_2 和 H_2 较小而 H_1 较大时，不利于系统达到理想状态。然而在实际施工过程中，施工工人和施工单位质量管理人员都具有有限理性和信息不完备的特征，普遍存在认知偏差和过度自信，与此同时，根据前景理论可知，博弈参与主体在面对概率性收益和确定性收益容易表现出风险厌恶而选择确定性收益，而在面对确定性损失和概率性损失时容易表现出风险偏好而选择概率性损失[4]，进而导致主体的行为决策产生系统性偏差，使得系统演化难以达到理性状态，具体分析如下：

(1) 过度自信

过度自信表现为个体在评估自身能力、知识水平、未来结果或相对优势时，系统性地高估自己的能力或低估风险[25]。高速铁路施工工人和施工单位质量管理人员普遍存在过度自信的特征。施工工人由于长期从事施工任务积累了丰富的施工经验，往往容易出现对自身技术能力及施工状况的认知偏差，具体表现为高估自身技术熟练度、简化复杂工艺和轻视环境因素影响。认知偏差的存在导致施工工人低估质量问题风险，存在“以前没出过问题，这次也不会出事”和质量违规行为不会被施工单位质量管理人员发现的侥幸心理。施工单位质量管理人员的过度自信表现为过度依赖历史经验、忽视风险概率的累积效应、高估监管体系的有效性和低估技术复杂性等[26]，质量管理人员主观低估质量问题出现的概率和损失，认为“事故不会发生在我任期内”，从而降低管理投入意愿。

(2) 质量合规行为感知成本和积极管理感知成本高

施工工人和施工单位质量管理人员容易高估质量合规行为成本和积极管理成本。对施工单位质量管理人员而言，影响积极管理感知成本的主要因素是质量教育培训成本和质量监督与检查成本。铁路工程项目建设周期长，大部分施工工人来自劳务分包公司，施工工人流动性大，对新招聘的施工工人进行培训需要额外花费费用和时间。同时，在现有的技术条件下，施工单位质量管理人员往往难以做到全方位和连续的监管，因此，施工工人容易出现在质量管理人员监督检查时表现出质量合规行为，而在质量管理人员离开后又表现出质量违规行为的现象。对施工工人而言，选择质量合规行为需要付出额外的时间和精力去理解操作规范、学习相关的技术和质量标准知识，而采取质量违规行为仅有一定概率会产生损失，所以施工工人会倾向选择质量违规行为。

(3) 质量合规行为感知效价和积极管理感知效价低

施工工人质量合规行为效价指的是施工工人对其选择质量合规行为可能获得的工资和奖金的感知，在铁路工程项目中施工过程中，常有拖欠施工工人工资的现象，这种现象可能使得施工工人会更关注短期的收益，而忽视长期的质量合规所带来的潜在收益。施工单位质量管理人员效价指施工单位质量管理人员对其选择积极管理可能获得的工资和质量绩效提升的感知，由于高速铁路工程项目建设周期长，质量绩效提升的收益难以在短期内量化，存在不确定性和滞后性，在进度压力下施工单位质量管理人员会倾向于选择消极管理。

(4) 风险偏好和风险厌恶

根据前景理论和心理账户理论可知，施工工人在面对“获得”等收益时表现为风险厌恶，λ 较大，β 和 α 较小，此时施工工人选择质量合规行为和质量违规行为的效价相差不大；施工工人在面对“失去”等损失时，往往表现为风险偏好，μ 和 σ 较大，δ 较小，对施工工人而言，选择质量合规行为有确定性的成本 C_1，而选择质量违规行为的确定性成本 C_2 明显小于 C_1，且选择质量违规行为仅有一定概率被处罚和需要承担质量风险成本，此时在两者策略效价相差不大的情况下，大多数施工工人由于侥幸心理倾向于选择质量违规行为，而不愿承担选择质量合规行为需要多付出的确定性成本。

3. 案例分析及仿真

为保证模型仿真结果的可靠性，参考以往研究中模型参数的确定方法，本文结合项目实际调研和研究经验数据相结合的方式确定施工单位质量管理人员主体和高速铁路施工工人主体的属性值以及相关函数变量值，使用 MATLAB R2023a 进行仿真。案例依托项目为新建沈阳至白河高速铁路的某标段施工项目的桥涵工程，该标段项目位于辽宁省，施工现场管理模式采用架子队管理模式，项目的质量目标如下：按照高速铁路工程项目质量验收标准要求各检验批、分项、分部工程施工质量合格率达到 100%以及单位工程一次性验收合格率 100%。标段项目施工单位采用质量“四化”控制(包括信息化、工厂化、专业化和机械化)、质量奖惩制度、标准化的施工质量控制流程、质量教育和培训以及质量责任管理制度等手段保障施工质量，分别作用于演化博弈模型中的参数。施工期间，施工现场的质量管理人员平均每天约 30 人，在岗施工工人数平均每天约 500 人，施工工人月平均工资约 5000 元，施工单位质量管理人员月平均工资约 11000 元，两者比例可估算为 5:11，据此设定 I 和 D_1 为 5 和 11。施工单位质量管理人员的工资一般高于高速铁路施工工人，两者的效价参考点和成本参考点存在差异，据此设定高速铁路施工工人的效价参考点 x_{0w} 和成本参考点 x_{1w} 为 4，施工单位质量管理人员效价参考点 x_{0m} 和成本参考点 x_{1m} 为 7。考虑到高速铁路施工工人和施工单位质量管理人员对施工质量的认知是逐渐深化的，据此假定初始时刻施工工人选择质量合规行为策略和施工单位质量管理人员积极管理的比例为 0.4，又因为质量管理责任制和工程质量奖惩制度的存在，在施工质量问题出现后，质量管理人员必须承担相应的质量管理责任，因此设置 h 为 1。一般来说，质量问题出现带来的损失 Q 相对较大，参考海因里希事故法则的 1:300 比例关系，假设质量问题出现的概率 p_0 为 0.003。与此同时，高速铁路施工工人主动选择质量合规行为往往比被施工单位质量管理人员纠正其质量违规行为效果要好，据此设置 E 和 G 的值分别为 0.6 和 0.4。成本账户的判断价值函数和效价账户的判断价值函数的相关参数参考 Tversky [9]和韩帅[11]等人的研究设定，其它参数的设置是结合项目调研情况和为了保证系统能够达到稳定状态(1, 1)进行赋值的，具体如下：

$H_1 = 5.7$，$H_2 = 5$，$C_1 = 2.5$，$C_2 = 2$，$R = 0.2$，$F = 0.2$，$Q = 50$，$D_2 = 1$，$x_{0m} = 7$，$x_{1m} = 7$，$x_{0w} = 4$，$x_{1w} = 4$，$\theta = 0.5$，$\alpha = 0.8$，$\beta = 0.88$，$\lambda = 2$，$\sigma = 2$，$\delta = 0.98$，$\mu = 0.98$。

3.1. 不同初始策略选择概率对博弈主体演化路径的影响

设定高速铁路施工工人选择质量合规行为策略的初始概率为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9，得到施工单位质量管理人员策略演化路径如图 1。据图可知，在上述仿真参数的前提下，施工单位质量管理人员策略最终均演化到“积极管理”策略，高速铁路施工工人选择质量合规行为策略的初始概率 x 会影响系统演化至理想稳定点的速度，具体而言，高速铁路施工工人选择质量合规行为策略的初始概率越大，施工单位质量管理人员策略向“积极管理”策略演化的速度越快。

设定施工单位质量管理人员选择积极管理策略的初始概率为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9，得到高速铁路施工工人策略演化路径如图 2。据图可知，在上述仿真参数的前提下，高速铁路施工工人策略最终均演

化到“质量合规行为”策略，施工单位质量管理人员选择积极管理策略的初始概率 y 会影响系统演化至理想稳定点的速度，具体而言，施工单位质量管理人员选择积极管理策略的初始概率越大，高速铁路施工工人策略向“质量合规行为”策略演化的速度越快。

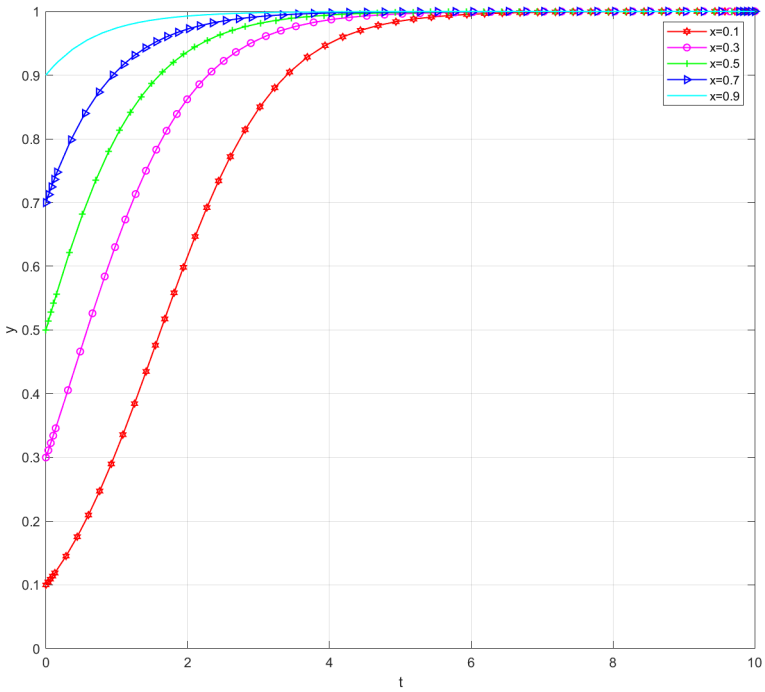

Figure 1. Evolutionary paths of strategies for quality managers in construction organizations under *x* change
图 1. *x* 变化下施工单位质量管理人员策略演化路径

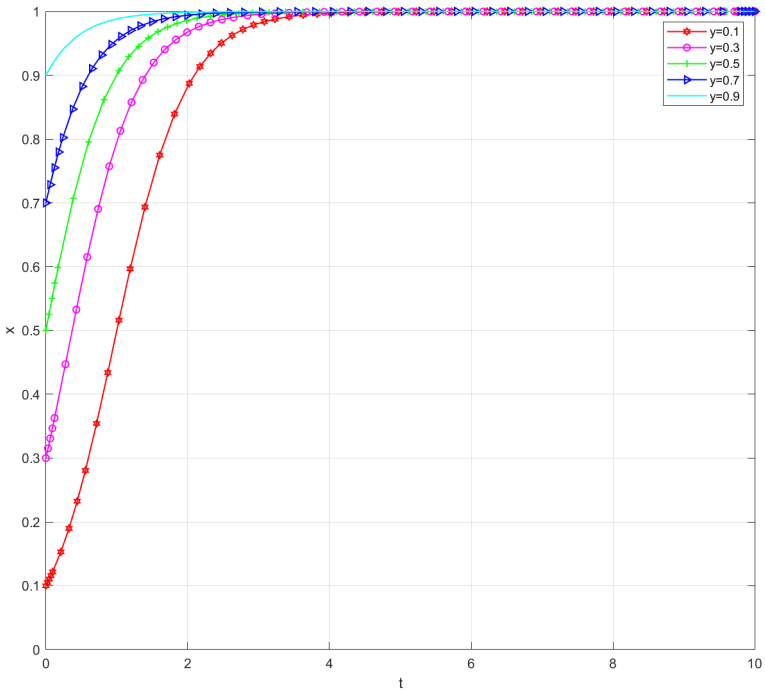

Figure 2. Evolutionary path of high-speed railway construction worker strategies under *y* change
图 2. *y* 变化下高速铁路施工工人策略演化路径

3.2. 高速铁路施工工人主体特征对其策略演化路径的影响

3.2.1. 质量合规行为成本对高速铁路施工工人策略演化路径的影响

为了探究质量合规行为成本对高速铁路施工工人策略演化结果的影响，设定质量合规行为成本分别为 2.5、3、3.5、4、4.5 和 5，其余仿真参数值保持不变，得到高速铁路施工工人策略演化结果，如图 3 所示。据图可知，随着 C_1 的增大，x 逐渐收敛于 1，且随着 C_1 的增大，x 收敛于 1 的速度变慢，即高速铁路施工工人质量合规行为成本越高，高速铁路施工工人策略向“质量合规行为”策略演化的速度越慢。因此，降低高速铁路施工工人的质量合规行为成本有利于其策略向“质量合规行为”策略演化。

3.2.2. 效价风险偏好系数对高速铁路施工工人策略演化路径的影响

为了探究不同效价风险偏好系数对高速铁路施工工人策略演化结果的影响，设定效价风险偏好系数(α，β)依次为(0.1, 0.18)、(0.2, 0.28)、(0.4, 0.48)、(0.6, 0.68)、(0.7, 0.78)和(0.8, 0.88)，得到高速铁路施工工人策略演化结果，如图 4 所示。据图可知，随着效价风险偏好系数的增大，x 逐渐收敛于 1，且随着效价风险偏好系数的增大，x 收敛于 1 的速度变快，即高速铁路施工工人效价风险偏好系数越高，高速铁路施工工人策略向“质量合规行为”策略演化的速度越快，这也与前景理论“决策主体面对收益时表现为风险厌恶”的结论相符，当高速铁路施工工人效价风险偏好系数较小时，施工工人对选择质量合规行为的潜在工资和奖励表现为风险厌恶，选择“质量合规行为”策略的速度变慢。

3.2.3. 成本损失风险偏好系数对高速铁路施工工人策略演化路径的影响

为了探究不同成本损失风险偏好系数对高速铁路施工工人策略演化结果的影响，设定成本损失风险偏好系数(μ，σ)依次为(0.18, 0.18)、(0.28, 0.28)、(0.48, 0.48)、(0.68, 0.68)、(0.88, 0.88)和(0.98, 0.98)，得到高速铁路施工工人策略演化结果，如图 5 所示。据图可知，随着成本损失风险偏好系数的增大，x 逐渐收敛于 1，且随着成本风险偏好系数的增大，x 收敛于 1 的速度变慢，即高速铁路施工工人成本损失风险偏好系数越高，高速铁路施工工人策略向“质量合规行为”策略演化的速度越慢，这也与前景理论“决策主体面对成本损失时表现为风险偏好”的结论相符，当高速铁路施工工人成本损失风险偏好系数较大时，施工工人对选择质量合规行为的确定性成本表现为风险厌恶，而对选择质量违规行为仅有一定概率被处罚和需要承担质量风险成本表现出风险偏好，因此选择“质量合规行为”策略的速度变慢。

3.3. 施工单位质量管理人员行为对其策略演化路径的影响

3.3.1. 积极管理成本对高速铁路施工工人策略演化路径的影响

为了探究不同积极管理成本对高速铁路施工工人策略演化结果的影响，设定 H_1 分别为 2.7、3.7、4.7、5.7、6.7 和 7.7，得到高速铁路施工工人策略演化结果，如图 6 所示。据图可知，H_1 在 5.7~7.7 之间存在阈值，当 H_1 小于阈值时，随着 H_1 的增大，x 逐渐收敛于 1，且随着 H_1 的增大，x 收敛于 1 的速度变慢，即随着施工单位质量管理人员积极管理成本的增加，高速铁路施工工人策略向“质量合规行为”策略演化的速度变慢；当 H_1 大于阈值时，x 逐渐变小至收敛于 0，即当施工单位质量管理人员积极管理成本过高时，高速铁路施工工人策略向“质量违规行为”策略演化。

3.3.2. 奖励对高速铁路施工工人策略演化路径的影响

为了探究不同奖励对高速铁路施工工人策略演化结果的影响，设定 R 分别为 0.2、0.5、1、2、3 和 4，得到高速铁路施工工人策略演化结果，如图 7 所示。据图可知，随着 R 的增大，x 逐渐收敛于 1，且随着 R 的增大，x 收敛于 1 的速度变快，即随着施工单位质量管理人员对高速铁路施工工人质量合规行为奖励的增加，高速铁路施工工人策略向“质量合规行为”策略演化的速度变快，奖励对高速铁路施工工人选

择质量合规行为策略有正向效应。因此，增加对高速铁路施工工人的质量合规行为的奖励有利于其策略向“质量合规行为”策略演化。

3.3.3. 惩罚对高速铁路施工工人策略演化路径的影响

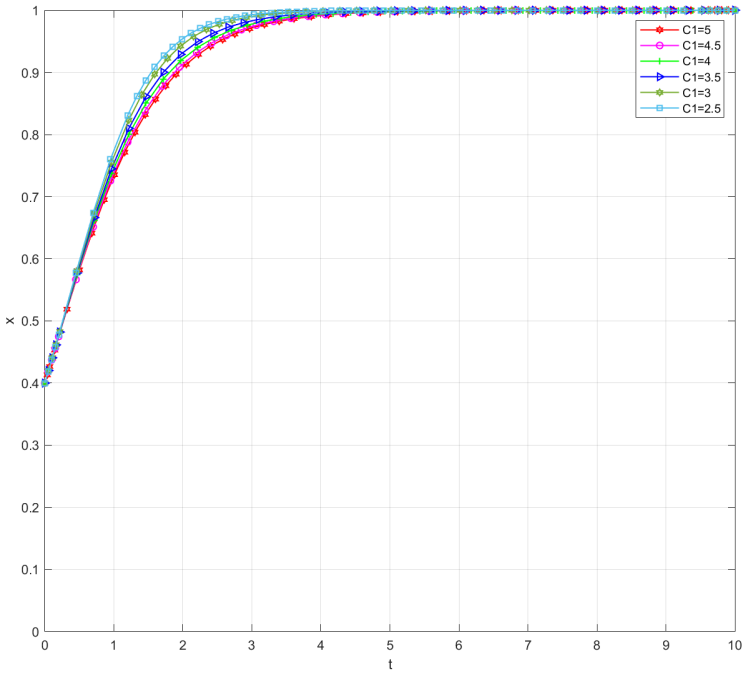

Figure 3. Evolutionary outcomes under different C_1
图 3. 不同 C_1 情形下演化结果

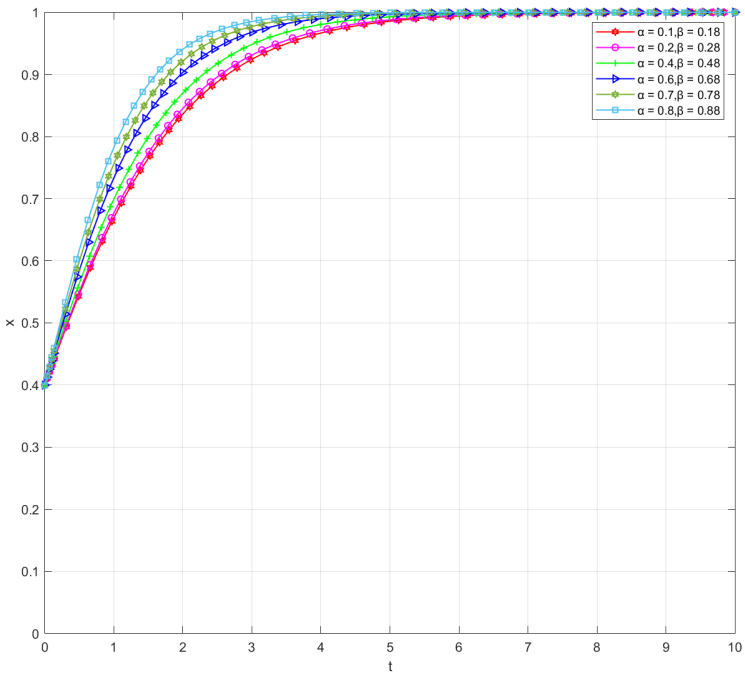

Figure 4. Evolutionary outcomes under different (α, β)
图 4. 不同(α, β)取值情形下演化结果

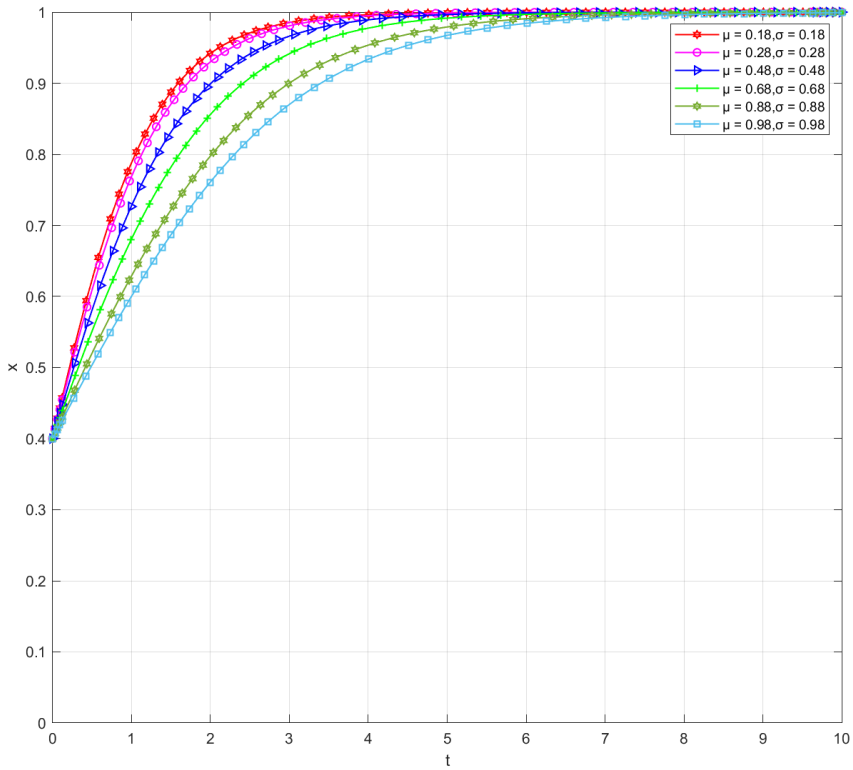

Figure 5. Evolutionary outcomes under different (μ, σ)
图 5. 不同(μ, σ)取值情形下演化结果

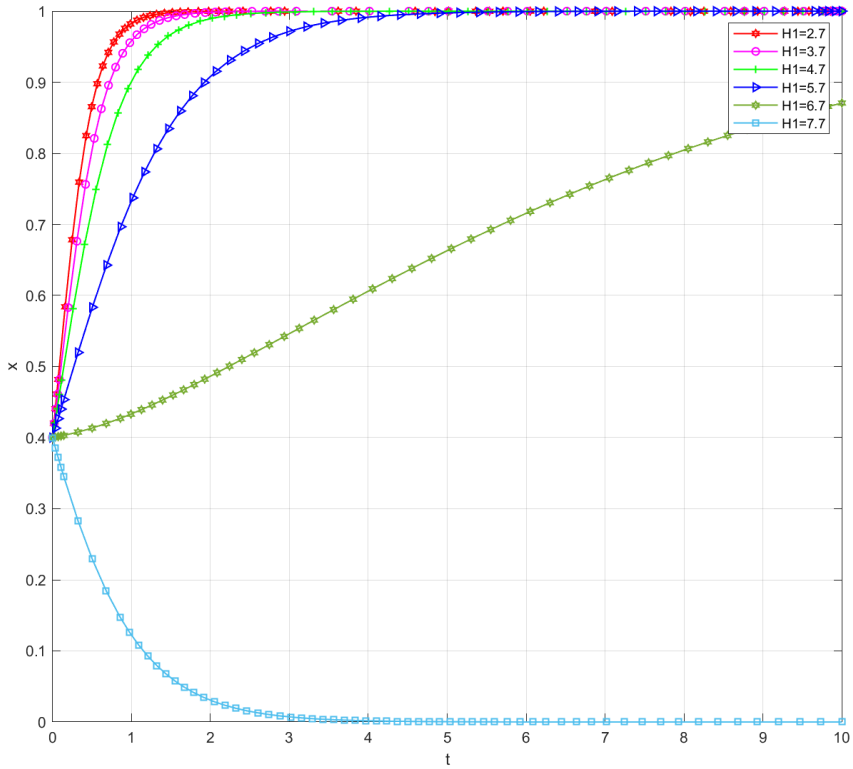

Figure 6. Evolutionary outcomes under different H_1
图 6. 不同 H_1 情形下演化结果

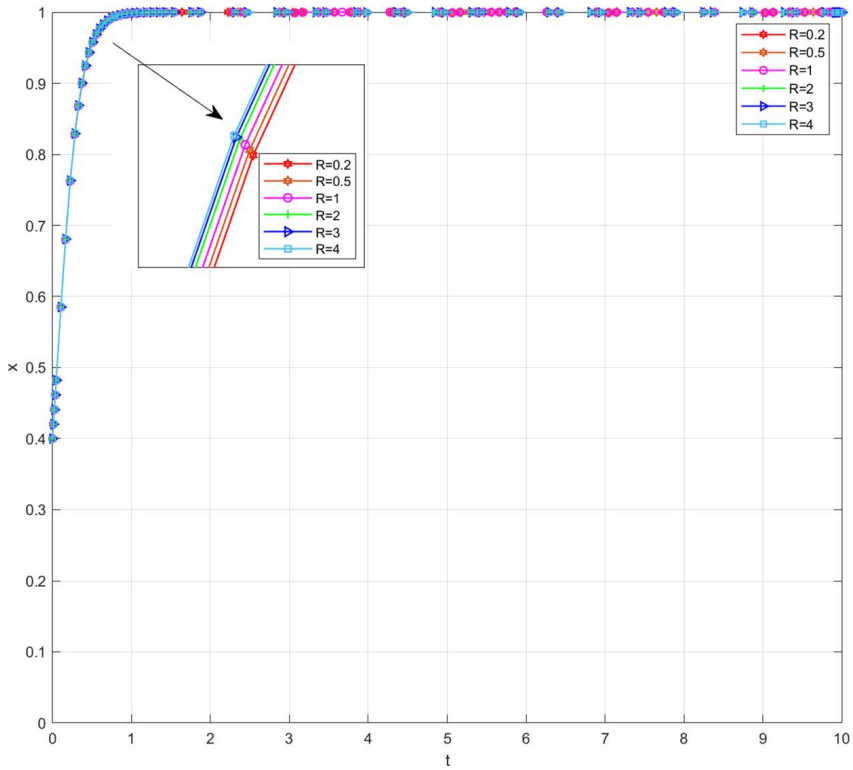

Figure 7. Evolutionary outcomes under different *R*
图 7. 不同 *R* 情形下演化结果

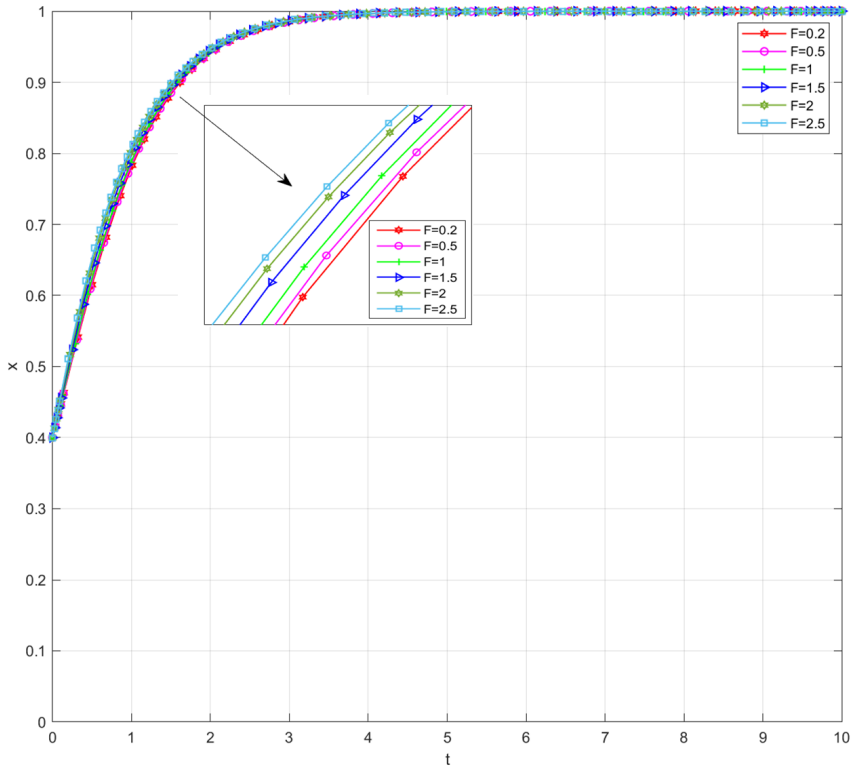

Figure 8. Evolutionary outcomes under different *F*
图 8. 不同 *F* 取值情形下演化结果

为了探究不同惩罚对高速铁路施工工人策略演化结果的影响，设定 F 分别为 0.2、0.5、1、1.5、2 和 2.5，得到高速铁路施工工人策略演化结果，如图 8 所示。据图可知，随着 F 的增大，x 逐渐收敛于 1，且随着 F 的增大，x 收敛于 1 的速度变快，即随着施工单位质量管理人员对高速铁路施工工人质量违规行为惩罚的增加，高速铁路施工工人策略向“质量合规行为”策略演化的速度变快，惩罚对高速铁路施工工人选择质量合规行为策略有正向效应。因此，适当增加对高速铁路施工工人选择质量违规行为的惩罚有利于其策略向“质量合规行为”策略演化。

4. 结语

本文将前景理论和心理账户理论结合到演化博弈模型的分析中，对高速铁路施工工人质量行为演化过程和系统演化稳定性条件进行了分析，并探索分析了系统难以达到施工单位质量管理人员选择积极管理策略和高速铁路施工工人选择质量合规行为策略的理想状态的原因，并利用 MATLAB R2023a 进行了数值仿真，探讨了不同初始策略概率、高速铁路施工工人主体特征以及施工单位质量管理人员行为对高速铁路施工工人质量行为策略选择演化路径的影响，结合演化博弈理论分析和数值仿真得到以下结论：

(1) 质量合规行为成本过高不利于高速铁路施工工人质量行为策略向“质量合规行为”策略演化；效价风险偏好系数和成本损失风险偏好系数不会改变高速铁路施工工人质量行为策略向“质量合规行为”策略演化的方向，但会改变演化的速度，效价风险偏好系数越大，向“质量合规行为”策略演化的速度越快，成本损失风险偏好系数越大，向“质量合规行为”策略演化的速度越慢。因此，有必要通过质量教育培训、标准化的施工流程以及采取质量“四化”控制提升高速铁路施工工人工作效率的方式降低施工工人质量合规行为成本，提升施工工人的质量意识和质量能力，确保施工质量。

(2) 施工单位质量管理人员积极管理成本过高不利于高速铁路施工工人质量行为策略向“质量合规行为”策略演化；提高对高速铁路施工工人的质量合规行为的奖励和加大对高速铁路施工工人的质量违规行为的处罚可以促进高速铁路施工工人质量行为策略向“质量合规行为”策略演化。因此，有必要合理计划好积极管理的成本以及制定合理的质量奖惩制度，对高速铁路施工工人的质量合规行为进行合理的奖励以及对其质量违规行为进行处罚。

基金项目

国家重点研发计划项目，铁路基础设施智能建造质量控制关键技术，2022YFB2602200。

参考文献

[1] Love, P.E.D., Teo, P. and Morrison, J. (2018) Unearthing the Nature and Interplay of Quality and Safety in Construction Projects: An Empirical Study. *Safety Science*, **103**, 270-279. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.026

[2] 孙永福. 基于供应链的铁路工程项目质量管理体系研究——以京沪高铁济南黄河大桥为例[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(S2): 1159-1164, 1264.

[3] 黄超, 周国华, 朱浩波. 基于计划行为理论的施工人员质量行为决策机制研究——以中国水电集团京沪高铁项目为例[J]. 建筑经济, 2010, 31(7): 74-77.

[4] 赵泽斌, 满庆鹏. 基于前景理论的重大基础设施工程风险管理行为演化博弈分析[J]. 系统管理学报, 2018, 27(1): 109-117.

[5] 叶贵, 杨丽萍, 李学征, 等. 奖惩对建筑工人安全行为演化的正向效应研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 201-210.

[6] 王佩茜. “BOT + EPC”高速公路项目总承包商质量行为研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

[7] 马海骋, 贾静, 盛金喜, 等. 取消强制监理对施工单位质量行为的影响研究——基于博弈分析[J]. 建筑经济, 2020, 41(9): 10-13.

[8] 汪玉亭, 丰景春, 张可. 政府监管下工程建设质量行为风险传递的演化博弈研究[J]. 软科学, 2021, 35(12): 119-

128.

[9] Tversky, A. and Kahneman, D. (1992) Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, **5**, 297-323. https://doi.org/10.1007/bf00122574

[10] Thaler, R.H. (2008) Mental Accounting and Consumer Choice. *Marketing Science*, **27**, 15-25. https://doi.org/10.1287/mksc.1070.0330

[11] 韩帅, 陈红, 龙如银. 基于 PT-MA 理论的煤矿安全群体行为演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2017, 26(11): 77-86.

[12] 陈艳, 吕云翔, 谢运慧. 基于 PT-MA 理论的 PPP 项目风险管理行为演化博弈分析[J]. 系统科学学报, 2020, 28(4): 65-70.

[13] 何长全, 贾广社, 孙继德. 三方博弈视角下项目安全行为治理策略分析[J]. 软科学, 2019, 33(1): 87-90.

[14] 盛昭瀚, 薛小龙, 安实. 构建中国特色重大工程管理理论体系与话语体系[J]. 管理世界, 2019, 35(4): 2-16, 51, 195.

[15] Grinblatt, M. and Han, B. (2005) Prospect Theory, Mental Accounting, and Momentum. *Journal of Financial Economics*, **78**, 311-339. https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2004.10.006

[16] Langer, T. and Weber, M. (2001) Prospect Theory, Mental Accounting, and Differences in Aggregated and Segregated Evaluation of Lottery Portfolios. *Management Science*, **47**, 716-733. https://doi.org/10.1287/mnsc.47.5.716.10483

[17] 周国华, 张羽, 李延来, 等. 基于前景理论的施工安全管理行为演化博弈[J]. 系统管理学报, 2012, 21(4): 501-509.

[18] 杨明歌, 杨卓, 梁小珍. 基于 PT-MA 理论的销售商再制品价格欺骗行为演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2023, 32(11): 94-101.

[19] Hofbauer, J. and Sandholm, W.H. (2007) Evolution in Games with Randomly Disturbed Payoffs. *Journal of Economic Theory*, **132**, 47-69. https://doi.org/10.1016/j.jet.2005.05.011

[20] Friedman, D. (1991) Evolutionary Games in Economics. *Econometrica*, **59**, 637-666. https://doi.org/10.2307/2938222

[21] Friedman, D. (1998) On Economic Applications of Evolutionary Game Theory. *Journal of Evolutionary Economics*, **8**, 15-43. https://doi.org/10.1007/s001910050054

[22] 李玉, 吴斌, 王超. 基于前景理论的众包物流配送方行为决策演化博弈分析——基于发货方视角[J]. 运筹与管理, 2019, 28(6): 129-135.

[23] 赵哲耘, 刘玉敏, 刘莉. 基于前景理论的药品质量安全监管演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2022, 31(10): 75-81.

[24] 侯学良, 汪勇. 基于核主元分析和贝叶斯推理的建设工程项目质量状态在线诊断模型及其仿真[J]. 系统管理学报, 2015, 24(4): 472-479.

[25] Larkin, I., Pierce, L. and Gino, F. (2012) The Psychological Costs of Pay-for-Performance: Implications for the Strategic Compensation of Employees. *Strategic Management Journal*, **33**, 1194-1214. https://doi.org/10.1002/smj.1974

[26] Malmendier, U., Pezone, V. and Zheng, H. (2023) Managerial Duties and Managerial Biases. *Management Science*, **69**, 3174-3201. https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4467