

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2025.08.005

重大工程绿色管理主体行为的随机演化博弈^①

高鑫¹, 曾若辰^{2*}, 宋瑞震¹, 孟晓华³

(1. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 上海 200030; 2. 上海大学悉尼工商学院, 上海 201899;
3. 苏州大学政治与公共管理学院, 苏州 215123)

摘要: 重大工程绿色管理能够降低工程建设对区域生态环境的影响. 然而, 鉴于工程建设周期长且其对周边环境的潜在影响程度难以准确预测, 承包商、业主与环保部门作为工程建设阶段绿色管理的关键主体, 在制定绿色管理决策时易受到不确定因素的影响. 本研究将随机过程嵌入演化博弈理论, 重构了承包商、业主与环保部门间的随机演化博弈模型, 探索了各博弈主体参与绿色管理的策略选择过程, 分析了不同因素对其策略选择的影响效果. 研究发现: 承包商选择绿色建造、业主采取服务型策略、环保部门实施随机抽查, 共同构成了实现重大工程绿色管理的稳定策略集. 增强各主体参与绿色管理的初始合作意愿能有效降低其决策的波动性, 降低环保总成本并合理设定业主分摊的环保成本比例将促进各主体更快达到绿色管理的稳定状态. 此外, 提升承包商的社会声誉可推动其采纳绿色建造策略, 而承包商对业主的积极评价将有助于培育服务型业主; 承包商与业主的绿色管理决策对随机扰动更为敏感. 本研究所构建的随机演化博弈模型在一定程度上扩展了传统的绿色管理研究方法, 而阐释的服务型业主理念能够为重大工程实践中的绿色管理长效机制构建提供决策参考.

关键词: 重大基础设施工程; 绿色管理; 演化博弈; 随机过程; 数值仿真

中图分类号: F224.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2025)08-0071-16

0 引言

重大基础设施工程(以下简称重大工程)是对国家政治、经济、社会以及生态环境等方面具有重要影响的大型公共工程设施, 例如三峡工程、南水北调工程、青藏铁路工程等^[1]. 该工程的建设通常会对区域的生态环境产生未知的、持续性的影响^[2, 3], 在我国“推动生态文明建设, 促进绿色发展”的背景下, 如何通过绿色管理减少重大工程建设对区域生态环境的影响, 已成为重大工程管理领域不容忽视的重要议题^[4, 5].

重大工程绿色管理是将“绿色管理”理念融入到重大工程这一特殊情境^[6], 以绿色可持续发

展为指导, 运用系统理念、方法和技术, 在工程全生命周期中进行计划、组织、指导、协调、控制和评价, 以实现资源节约和生态环境高水平保护的目标^[7]. 由此可知, 重大工程绿色管理应贯穿于项目的全生命周期, 在确保工程质量、控制成本、遵守工期和安全保障等目标的基础上, 全面融入各类生态环境保护要求, 这一管理方式有助于工程建设目标和环境保护目标的“双丰收”. 同时, 重大工程绿色管理是一项复杂的系统工程, 而要建立一套完善的绿色管理体系, 必须实施规划期的绿色设计、建设期的绿色建造以及竣工后的绿色运营. 但在工程实践中, 重大工程绿色管理通常围绕环境影响评价与“三同时”制度展开^[8, 9], 这导

① 收稿日期: 2021-08-01; 修订日期: 2024-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72201162; 72174136); 国家自然科学基金资助专项项目(71942006).

通讯作者: 曾若辰(1991—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 讲师. Email: rczeng@shu.edu.cn

致目前的绿色管理工作主要集中于工程环境影响评价的事前管理以及环境验收的事后管理,而忽略了建设期间的事中管理,从而导致了重大工程绿色管理的“哑铃”现象^[10]. 重大工程的建设阶段是对自然环境改造最为显著且最易引发环境突发事件的关键时期,也是参与主体众多并存在复杂交互关系的集中时期,还是受到诸多不确定因素影响的敏感时期. 因此,针对重大工程建设阶段的绿色管理研究显得更为紧迫.

在重大工程建设阶段,绿色管理的有效实施涉及众多利益相关者,并且它们在绿色管理中的职责存在显著差异. 承包商作为重大工程的实际建设者,通常受制于业主的“甲方优势”而不得不独自承担环保压力与风险,否则就面临“出局”的危险,这使其缺乏主动进行绿色建造的积极性. 业主作为重大工程的管理者,在建设规模逐步扩大、复杂性日益提高以及环保挑战不断涌现的现实约束下,若仅依靠承包商独自面对各项环保压力与风险将越发不合时宜. 环保部门作为重大工程的监督者,通过实施监督与奖惩职能以保障绿色管理的有效实施. 由此可见,在重大工程建设阶段的绿色管理过程中,各利益相关者所承担的职责各异,而实际执行的绿色管理措施则是各方动态博弈的结果. 同时,由于重大工程建设周期长,它对周边环境破坏的程度难以被准确预测,则各利益相关者参与绿色管理的决策易受到一系列随机因素的影响. 因此,在重大工程建设阶段,如何在诸多不确定因素的影响下,探索关键利益主体在参与绿色管理过程中的策略选择,并揭示不同因素对其决策的影响? 这是本研究要探讨的核心问题. 对以上问题的解答不仅能丰富现有重大工程绿色管理的研究内容,而且能在工程实践中为构建绿色管理的长效实施机制提供理论支持.

1 文献综述

1.1 绿色管理

绿色管理起源于20世纪50年代,随着绿色经济的迅猛发展,它开始深刻影响传统企业的管理思想. 德国学者Waldemar Hopfenbeck于1990年在《绿色管理革命》一书中正式提出“绿色管理”概

念. 其后,学者从不同角度对其进行解析. 杨中杰与朱羽凌^[11]认为绿色项目管理是以可持续发展为指导思想,将环保理念融入项目管理活动,并通过合理规划和组织资源以达成既定目标,实现经济、社会与生态效益共赢. 胡桂祥与张建坤^[12]认为绿色管理是以满足消费者需要为中心,通过生产、营销、理财等方式,为实现经济效益、社会效益的协调统一而进行的全过程、全员、全面的管理活动. 目前,绿色管理的定义尚未统一,但其目标已被广泛认可,即任何组织在各项活动中都应将节约资源、减少污染以及保护环境作为管理的核心要素之一,以实现生态与经济的共赢.

目前,绿色管理已广泛渗透至不同研究领域,改变了这些领域的固有模式. 以工程项目管理为例,绿色管理的融入丰富了传统工程项目管理的目标表达,将环保嵌入到进度、质量、成本等目标中,形成了“绿色工程项目管理”的新理念. 首先,该理念使工程项目管理不再以单纯追求经济效益为唯一目标,转而追求“经济效益、社会效益与环境效益”的多元复合目标. 其次,该理念的融入扩展了工程项目的管理周期,要求从项目调研、立项、规划、建设、运营到拆除的全过程,均以绿色发展为指导,全面贯彻资源节约和污染防治等原则. 在现有的绿色管理研究中,绿色工程项目管理^[13]、绿色供应链管理^[14]与环境管理体系构建^[15]等方向受到了广泛关注,而重大工程绿色管理的研究尚显不足.

1.2 演化博弈论

演化博弈论源于生物进化论,它将博弈论与生物演化过程进行了系统融合^[16]. 区别于经典博弈论,演化博弈论将参与者的有限理性作为核心假设^[17, 18],强调博弈参与人可在重复博弈过程中不断学习其他参与人的决策经验并调整自身策略,以实现收益最大化^[19]. 由此可见,该理论的分析重点在于探索博弈主体决策的动态均衡过程. 由于它更加符合参与人的实际决策特征,因此被广泛应用于工程管理、市场竞争分析、政策评估等领域.

在重大工程管理领域,学者们应用该理论从工程创新、工程监管、生态补偿等角度对重大工程不同参建单位之间的博弈关系展开研究. 刘娜娜

与周国华^[20]融合前景理论与演化博弈论,分析了重大工程协同创新中资源提供方与接收方之间的博弈过程. 吕乐琳与王卓甫^[21]构建了关于重大工程交易行为监管的演化博弈模型,分析了数字建造平台等级对发包方、监理方与承包方的决策影响. Sheng 与 Webber^[22]以南水北调工程为例,通过构建上游用户、下游用户以及中央政府之间的三方演化博弈模型,探索了它们参与流域生态补偿的“激励-兼容”机制. 由此可知,学者们应用该理论已从多角度探索了重大工程管理过程中的多主体博弈问题,但较少涉及绿色管理领域,并且尚未充分考虑不确定因素对博弈主体决策的影响.

1.3 重大工程利益相关者

基于全生命周期视角,学者们从集团类别^[23]、角色定位^[24]、契约关系^[25]等维度识别了重大工程利益相关者,其中业主、环保部门、承包商与公众被视为关键利益相关者^[26]. 鉴于重大工程的公共属性特征,业主通常扮演“代理人”角色,并与其他利益相关者建立广泛联系. 在绿色管理中,业主作为重大工程管理者,高度关注工程建设的环保目标,通过履行监督与管理职能以约束承包商的环境行为,确保工程建设活动符合环境保护的要求^[25]. 承包商在重大工程建设过程中扮演着多样化的角色并承担不同的职责^[27]. 例如:设计规划承包商负责工程前期的绿色设计,施工承包商负责建设中的绿色建造,而运营承包商则负责竣工后的绿色运营与维护等^[7]. 环保部门作为政府的重要职能部门,代替政府行使环保监督与奖惩职能. 在重大工程建设中,环保部门将差异化的环境规制政策融入实际的环境监管中,以降低工程建设对周边环境的影响. 同时,鉴于重大工程建设会改变公众的生活空间,公众通常被认为是重要的外部利益相关者^[28]. 它们一般通过参与工程规划与设计阶段的环评听证会,进而加入到绿色管理行列. 目前,对于重大工程利益相关者的识别尚缺乏统一标准,导致现有研究中涉及的利益相关者类型繁多. 若不加筛选地将所有利益相关者均纳入到重大工程建设阶段的绿色管理研究,将难以厘清彼此间的交互关系. 因此,应在重大工程建设阶段的研究边界内,依照参与主体工

作职能与绿色管理的紧密性原则,将施工承包商、业主与环保部门作为关键利益相关者进行针对性的研究.

1.4 重大工程利益相关者决策的影响因素

重大工程建设因其固有的复杂性与不确定性,导致各利益相关者的决策易受到差异化因素的影响. 深入理解这些因素所带来的影响,将有利于提高各利益相关者的决策效率^[29].

学者主要以重大工程利益相关者的差异化目标为前提,基于复杂网络、博弈论等分析方法,探究各因素如何影响利益相关者的决策. 陈志超等^[30]结合复杂网络与博弈论,构建了重大工程风险管理主体间的“Agent-元胞自动机”模型,发现风险预期收益、损失敏感度与策略兼容性等因素显著影响主体的风险决策. 王婧怡等^[31]构建利益相关者价值网络模型研究了重大工程利益相关者在组织安全行为方面的价值交换与传递过程,强约束力、组织安全行为的结构位置等是关键影响因素. 孙蕾与孙绍荣^[32]基于复杂网络构建了重大工程舆情传播模型,分析了舆情传播过程中社会公众与政府决策之间的交互影响. 研究发现政府采取舆情处置的效率、公信力水平以及公众的风险感知等是重要的影响因素. 现有研究主要在确定性条件下探讨影响重大工程利益相关者决策的因素,忽略了不确定因素(复杂多变的自然环境、突发事件的出现等)的作用;同时,较少学者围绕绿色管理这一主题开展分析. 因此,有必要将这些不确定因素纳入研究框架,在不确定环境下进行利益相关者的决策行为分析,以进一步丰富该领域的研究.

综上,关于重大工程绿色管理的研究主要集中于利益相关者的识别和决策影响因素分析上,但现有研究多从静态、确定性角度切入,尚缺乏对不确定因素影响下重大工程建设阶段的绿色管理研究. 基于此,本研究关注重大工程建设阶段的绿色管理,首先将随机过程嵌入到演化博弈模型中,重构了承包商、业主与环保部门的三方随机演化博弈模型;其次,研究了在不确定因素干扰下各主体的策略选择演化;再次,结合数值仿真,分析了不同因素对各主体决策的影响过程;最后,提出针对性的政策建议.

本研究的创新点在于:首先,通过将随机过程融入演化博弈模型,为探索不确定因素影响下的重大工程绿色管理多主体策略选择过程提供了新思路,有助于揭示不同影响因素的作用机制.其次,本研究阐释的“服务型业主”理念,为工程实践中业主与承包商之间伙伴关系的重塑提供了新视角,这将有助于促进双方的协同合作,为重大工程绿色管理的长效实施提供动力和支撑.

2 演化博弈模型

2.1 问题描述

在重大工程建设阶段,承包商、业主与环保部门构成了绿色管理的关键利益相关者群体.该阶段的绿色管理是一项复杂任务,其有效实施依赖于它们的紧密合作.但由于各利益相关者在绿色管理中承担着差异化的职责,进而导致彼此间存在复杂的博弈关系.首先,承包商作为重大工程的建设主体,其核心职责是在保证工程质量与安全的基础上,通过采纳绿色创新技术、实施绿色管理模式等方式,科学推进绿色建造以最大程度的降低工程建设对周围环境的影响^[7].在此过程中,其目标不仅是在工程建设中获得短期盈利,而且希望通过参与重大工程建设以提升企业的社会声誉并获得长期收益.面对业主与环保部门的双重监管以及巨额环保成本的约束,承包商在施工方法的选择上既要考虑自身的经济利益,也要兼顾工程的环境影响.因此,是否采用绿色建造策略则成为了承包商参与绿色管理的关键决策点,而该决策通常与环保成本、社会声誉、业主与环保部门的监管等因素有关.其次,业主作为重大工程的管理主体,其在绿色管理中的主要职责是建立和完善相关激励与监督机制,以促进承包商严格遵循绿色建造标准,确保环保目标达成.那么,业主是作为“服务型业主”(通过主动分摊承包商的环保成本、提供绿色环保技术与知识支持以及开展环保培训等,例如港珠澳大桥管理局)还是“管理型业主”(通过合同条款来约束和管理承包商的绿色建造,例如京沪高速铁路股份有限公司)参与到绿色管理中,这将对承包商的环保成本和环境风险承担产生显著影响.因此,业主选择何种管理

模式是激励承包商实施绿色建造的关键,这通常与业主的环保监督成本、承包商对业主的评价等因素有关.再次,根据《中华人民共和国环境保护法》以及《建设项目环境保护管理条例》,环保部门作为政府的环境保护职能机构,拥有代表政府执行环境监督与奖惩职责的权力.在执行环境监督职能时,它可通过日常监督与随机抽查的方式来确保环境法规的遵守.因此,环保部门扮演着监督主体的角色,其主要职责是执行对重大工程环境影响的监督与检查,并对具有突出环境贡献或者导致环境污染的单位予以表彰或处罚.那么,提升环保部门的监督效率是确保绿色管理有效实施的重要保障,这通常与环保部门的监督成本及其实施奖惩的力度等因素有关.此外,鉴于重大工程建设引发的环境影响通常伴随着不确定性(如地质、水文、气象等自然条件变化;由于技术故障或者人为失误等因素导致环境污染发生的可能性等),各利益相关者在策略选择时不可避免地会受到这些不确定因素的干扰^[33].

由此可知,在重大工程建设阶段的绿色管理中,不同利益相关者承担着各自独特的职责,这导致它们在进行策略选择时必须考虑其他主体所选策略对自身的影响,并依据获取的信息与经验不断调整自身策略.该过程是一个复杂的动态交互过程,其本质是各主体之间的博弈互动.因此,本研究将结合随机过程与演化博弈论,在不确定因素的影响下,探索各博弈主体在参与绿色管理过程中的策略选择过程并揭示各因素对其决策的影响效果,旨在为重大工程绿色管理的长效实施提供科学的理论依据与决策支持.

2.2 基本假设

本研究对所构建的演化博弈模型作出如下假设.

1) 模型包含承包商、业主与环保部门三个博弈群体.它们均为有限理性,即无法在一次博弈中找到最优策略,但能通过学习、模仿等方式在多次博弈中找到最优策略.

2) 在重大工程建设阶段,承包商一方面希望通过绿色建造提高企业的社会声誉以获得长远利益,另一方面又担心高昂的环保成本会压缩其利润空间.因此,承包商的可选策略为“绿色建造”

与“非绿色建造”, 概率分别为 x 与 $1 - x$.

3) 为了激励承包商落实绿色建造, 业主可选择“服务型”策略, 通过分摊承包商环保成本、提供绿色环保技术与知识支持、组织专门的环保培训等方式以降低承包商的环保资金压力及其所面对的环境风险. 此外, 部分业主认为环保是承包商应履行的工程建设任务之一并且相关要求已明确列示在合同中, 而不应由业主额外再承担环保成本, 则其将选择“管理型”策略. 因此, 业主的可选策略为“服务型”与“管理型”, 概率分别为 y 与 $1 - y$.

4) 环保部门负责对重大工程行使环境监督与奖惩职能. 一方面, 为降低重大工程对环境的影响, 环保部门可采取日常监督来及时获取工程建设的环境信息, 并根据情况实施奖惩. 另一方面,

考虑到业主对承包商同样承担监督职责, 环保部门出于对业主的信任以及避免重复监督, 可采用随机抽查的方式进行监管. 因此, 环保部门的可选策略为“日常监督”与“随机抽查”, 概率分别为 z 与 $1 - z$.

5) 若承包商不仅满足了合同规定的绿色建造要求, 而且超出了这些标准并对周围环境产生了积极影响, 环保部门将对其杰出的环保贡献予以表彰. 当承包商在建设过程中未能遵守环保规定而导致环境污染事件发生时, 环保部门将对其进行处罚.

2.3 收益矩阵

根据以上情景, 本研究定义了模型中的各个参数, 如表 1 所示.

表 1 参数定义^②

Table 1 Parameter definition

参数	定义
R	承包商完成工程建设合同所获得的收益
V_1	承包商进行绿色建造且未导致工程周围建设区域的环境污染时, 承包商所获得的社会声誉
G_1	承包商超额完成工程建设合同中所规定的绿色建造要求, 并对工程周围建设区域的环境起到额外保护作用时, 承包商获得环保部门的表彰
C	承包商完成工程建设合同所需要支付的建设成本
C_1	承包商进行绿色建造所需支付的环保总成本(例如: 购买环保设备、组建环保部门、配备专职环保人员等)
V_2	承包商采用绿色建造且未导致工程周围建设区域的环境污染时, 业主所获得的社会声誉
G_2	在工程周围建设区域未出现环境污染的情况下, 服务型业主因主动与承包商分担环保总成本, 受到环保部门的表彰
L	服务型业主获得承包商的好评(例如: 分摊承包商的环保成本、提供环保技术支持、管理培训等)
C_2	业主对承包商进行环保监督时所支付的监督成本
m	服务型业主分摊承包商绿色建造所产生环保总成本的比例
H	承包商选择绿色建造且未导致工程周围建设区域的环境污染时, 环保部门获得上级政府或者上级环保部门的行政奖励
C_3	环保部门采取日常监督时所支付的环保监督成本
b	承包商采用绿色建造, 但工程周围建设区域出现环境污染的概率
a	承包商采用非绿色建造而导致工程周围建设区域环境污染的概率
t	超额完成工程建设合同中所规定的绿色建造要求, 并对工程周围建设区域的环境起到额外保护作用的承包商比例
K	承包商采用绿色建造, 但工程周围建设区域仍出现环境污染, 环保部门对承包商的处罚
F	承包商采用非绿色建造而导致工程周围建设区域的环境污染, 环保部门对承包商的处罚
T	承包商采用绿色建造, 但工程周围建设区域仍出现环境污染, 环保部门对业主的处罚
U	承包商采用非绿色建造而导致工程周围建设区域的环境污染时, 环保部门对业主的处罚
W	在重大工程建设阶段的绿色管理过程中, 不确定因素的变化程度, 包括工程建设区域的地质、水文、气象等复杂自然环境因素变化, 以及突发技术故障或人为失误等因素导致环境污染发生的可能性等, 以下简称随机扰动

^②所有参数均为正数; $m, a, b, t \in [0, 1]$.

根据以上设定,在不同策略组合下,各博弈方的收益分析如下.

1) 策略组合为(绿色建造、服务型、日常监督).当承包商采用绿色建造且未造成工程周围建设区域的环境污染时,承包商可获得工程建设收益与社会声誉,支付工程建设成本与部分环保成本;而超出合同要求且对工程周围环境产生额外保护作用的承包商能获得表彰.此时,业主将获得社会声誉,环保部门将获得上级的行政奖励.业主选择服务型策略将使其获得承包商的好评与环保部门的表彰,但需要承担部分环保成本并支付对承包商的监督成本.环保部门除了获得上级部门的行政奖励外,还需承担日常监督成本并对承包商与业主进行表彰.当承包商采用绿色建造但仍出现了环境污染时,业主与承包商将面临环保部门的处罚.因此,承包商、业主与环保部门的收益分别为 $R+(1-b) V_1 + t(1-b) G_1 - (1-m) C_1 - C - bK$ 、 $(1-b) V_2 + (1-b) G_2 + L - m C_1 - C_2 - bT$ 与 $(1-b) H + b(K+T) - t(1-b) G_1 - (1-b) G_2 - C_3$.

2) 策略组合为(绿色建造、管理型、日常监督).当承包商采用绿色建造且未造成环境污染时,承包商能获得工程建设收益、社会声誉以及因超额完成环保任务而获得的表彰,并需要支付工程建设成本与全部环保成本;此时,业主与环保部门仍能获得社会声誉与行政奖励.由于业主选择管理型策略,则其不再分摊环保总成本,但需要支付对承包商的环保监督成本.环保部门仍需支付日常监督成本并对承包商与业主进行表彰.当承包商采用绿色建造,但仍导致了环境污染时,承包商与业主将面临相应的处罚.因此,三个主体的收益分别为 $R+(1-b) V_1 + t(1-b) G_1 - C_1 - C - bK$ 、 $(1-b) V_2 - C_2 - bT$ 与 $(1-b) H + b(K+T) - t(1-b) \times G_1 - C_3$.

3) 策略组合为(非绿色建造、服务型、日常监督).当承包商采用非绿色建造且未造成环境污染时,承包商可获得工程建设收益并承担工程建设成本;服务型策略将使业主获得承包商的好评与环保部门的表彰,同时支付承包商的环保监督

成本并分摊部分环保成本.环保部门将获得行政奖励,支付日常监督成本并实施对业主的表彰.如果承包商采用非绿色建造,有可能会引发环境污染.此时,承包商与业主将会面临环保部门的处罚.因此,各主体的收益分别为 $R + m C_1 - aF - C$ 、 $L + (1-a) G_2 - m C_1 - C_2 - aU$ 与 $a(F+U) - C_3 - (1-a) G_2$.

4) 策略组合为(非绿色建造、管理型、日常监督).承包商能获得工程建设收益并承担全部环保成本,当其采纳非绿色建造策略而导致了环境污染时,需额外承担环保部门的处罚.此时,业主仅需支付对承包商的监督成本,并在概率 a 的情况下受到环保部门的处罚.环保部门仅需承担日常监督成本,并在非绿色建造行为导致污染时,对承包商与业主实施处罚.因此,各主体的收益分别为 $R - aF - C$ 、 $- C_2 - aU$ 与 $a(F+U) - C_3$.

5) 策略组合为(绿色建造、服务型、随机抽查).环保部门不再承担日常监督成本且不再对承包商与业主进行奖惩,其他收益与支出与组合1)类似.各主体的收益分别为 $R+(1-b) V_1 - (1-m) C_1 - C$ 、 $(1-b) V_2 + L - m C_1 - C_2$ 与 $(1-b) H$.

6) 策略组合为(绿色建造、管理型、随机抽查).环保部门不再承担日常监督成本且不再对承包商与业主进行奖惩,其余收益与支出与组合2)类似.各主体的收益分别为 $R+(1-b) V_1 - C_1 - C$ 、 $(1-b) V_2 - C_2$ 与 $(1-b) H$.

7) 当策略组合为(非绿色建造、服务型、随机抽查)时,环保部门不再承担日常监督成本且不再对承包商与业主进行奖惩,其余收益与支出与组合3)类似.各主体的收益分别为 $R + m C_1 - C$ 、 $L - m C_1 - C_2$ 与 0 .

8) 当策略组合为(非绿色建造、管理型、随机抽查)时,环保部门不再承担日常监督成本且不再对承包商与业主进行奖惩,其余收益与支出与组合4)类似.各主体的收益分别为 $R - C$ 、 $- C_2$ 与 0 .

在不同策略组合下,各主体的收益如表2所示.

表 2 各博弈主体的收益矩阵
Table 2 Payoff matrix of each player

策略组合	承包商	业主	环保部门
(绿色建造,服务型,日常监督)	$A_{11} = R + (1 - b) V_1 + t(1 - b) \times G_1 - (1 - m) C_1 - C - bK$	$A_{12} = (1 - b) V_2 + (1 - b) \times G_2 + L - m C_1 - C_2 - bT$	$A_{13} = (1 - b) H + b(K + T) - t(1 - b) G_1 - (1 - b) G_2 - C_3$
(绿色建造,管理型,日常监督)	$A_{21} = R + (1 - b) V_1 + t(1 - b) \times G_1 - C_1 - C - bK$	$A_{22} = (1 - b) V_2 - C_2 - bT$	$A_{23} = (1 - b) H + b(K + T) - t(1 - b) G_1 - C_3$
(非绿色建造,服务型,日常监督)	$A_{31} = R + m C_1 - aF - C$	$A_{32} = L + (1 - a) G_2 - m C_1 - C_2 - aU$	$A_{33} = a(F + U) - C_3 - (1 - a) G_2$
(非绿色建造,管理型,日常监督)	$A_{41} = R - aF - C$	$A_{42} = -C_2 - aU$	$A_{43} = a(F + U) - C_3$
(绿色建造,服务型,随机抽查)	$A_{51} = R + (1 - b) V_1 - (1 - m) C_1 - C$	$A_{52} = (1 - b) V_2 + L - m C_1 - C_2$	$A_{53} = (1 - b) H$
(绿色建造,管理型,随机抽查)	$A_{61} = R + (1 - b) V_1 - C_1 - C$	$A_{62} = (1 - b) V_2 - C_2$	$A_{63} = (1 - b) H$
(非绿色建造,服务型,随机抽查)	$A_{71} = R + m C_1 - C$	$A_{72} = L - m C_1 - C_2$	$A_{73} = 0$
(非绿色建造,管理型,随机抽查)	$A_{81} = R - C$	$A_{82} = -C_2$	$A_{83} = 0$

2.4 复制动态方程

令各博弈主体选择不同策略时的平均收益为 π_{mn} , 期望收益为 $\bar{\pi}_m$, 其中 m 表示不同博弈主体且 $m \in \{1, 2, 3\}$ (分别对应承包商、业主与环保部门), n 表示各博弈主体策略集中的不同策略且 $n \in \{1, 2\}$ (分别对应策略集中的第一种与第二种策略).

承包商的平均收益与期望收益如式(1)~式(3)所示.

$$\pi_{11} = z [y A_{11} + (1 - y) A_{21}] + (1 - z) \times [y A_{51} + (1 - y) A_{61}] \quad (1)$$

$$\pi_{12} = z [y A_{31} + (1 - y) A_{41}] + (1 - z) \times [y A_{71} + (1 - y) A_{81}] \quad (2)$$

$$\bar{\pi}_1 = x \pi_{11} + (1 - x) \pi_{12} \quad (3)$$

业主的平均收益与期望收益如式(4)~式(6)所示.

$$\pi_{21} = z [x A_{12} + (1 - x) A_{32}] + (1 - z) \times [x A_{52} + (1 - x) A_{72}] \quad (4)$$

$$\pi_{22} = z [x A_{22} + (1 - x) A_{42}] + (1 - z) \times [x A_{62} + (1 - x) A_{82}] \quad (5)$$

$$\bar{\pi}_2 = y \pi_{21} + (1 - y) \pi_{22} \quad (6)$$

环保部门的平均收益与期望收益如式(7)~式(9)所示.

$$\pi_{31} = y [x A_{13} + (1 - x) A_{33}] + (1 - y) \times [x A_{23} + (1 - x) A_{43}] \quad (7)$$

$$\pi_{32} = y [x A_{53} + (1 - x) A_{73}] + (1 - y) [x A_{63} + (1 - x) A_{83}] \quad (8)$$

$$\bar{\pi}_3 = z \pi_{31} + (1 - z) \pi_{32} \quad (9)$$

各博弈主体的复制动态方程如式(10)~式(12)所示,该微分方程组即构成了确定性演化系统 I.

$$F_1(x) = dx/dt = x(\pi_{11} - \bar{\pi}_1) \quad (10)$$

$$F_2(y) = dy/dt = y(\pi_{21} - \bar{\pi}_2) \quad (11)$$

$$F_3(z) = dz/dt = z(\pi_{31} - \bar{\pi}_3) \quad (12)$$

3 随机演化博弈模型

3.1 随机演化系统的构建

基于确定性演化系统 I, 本研究引入随机过程以反映重大工程建设阶段中各种不确定因素对博弈主体策略选择的扰动. 因此, 相应的随机演化复制动态方程如式(13)~式(15)所示, 即构成了随机演化系统 II.

$$dx(t) = x(t) (\pi_{11} - \bar{\pi}_1) dt + Wx(t) [1 - x(t)] dw(t) \quad (13)$$

$$dy(t) = y(t) (\pi_{21} - \bar{\pi}_2) dt + Wy(t) [1 - y(t)] dw(t) \quad (14)$$

$$dz(t) = z(t) (\pi_{31} - \bar{\pi}_3) dt + Wz(t) [1 - z(t)] dw(t) \quad (15)$$

其中 $w(t)$ 表示一维标准维纳过程, 其增量为 $\Delta w(t) = [w(t+h) - w(t)] \sim N(0, \sqrt{h})$; $Wx(t) [1 - x(t)] dw(t)$ 、 $Wy(t) [1 - y(t)] dw(t)$ 与 $Wz(t) [1 - z(t)] dw(t)$ 表示随机干扰项.

3.2 随机演化系统稳定性的判别

在重大工程建设阶段, 随机演化系统 II 持续

受到外部不确定因素的影响. 因此, 必须在考虑外部扰动的影响下, 对系统的稳定性进行判别, 以探寻系统最终的稳定状态与达到此状态时所需的条件. 根据 Lyapunov 的稳定性判别定理, 当随机系统各状态方程所对应系统矩阵的所有特征值具有负实部时, 则该系统达到渐进稳定; 当特征值至少有一个具有正实部, 则该系统不稳定^[34]. 因此, 本研究采用雅可比矩阵来判定系统的稳定性.

在确定性系统 I 中, 令 $F_1(x)$ 、 $F_2(y)$ 以及 $F_3(z)$ 分别为 0, 可得 $E_1(0,0,0)$ 、 $E_2(1,0,0)$ 、 $E_3(0,1,0)$ 、 $E_4(0,0,1)$ 、 $E_5(1,1,0)$ 、 $E_6(1,0,1)$ 、 $E_7(0,1,1)$ 、 $E_8(1,1,1)$ 这 8 个纯策略纳什均衡点与混合策略纳什均衡点 $E_9(x^*, y^*, z^*)$. 由于进化稳定策略(evolutionarily stable strategy, ESS) 必须符合纯策略纳什均衡的条件^[35], 所以只需检验 $E_1 \sim E_8$ 是否为 ESS 即可. 在以上均衡点中, $E_5(1,1,0)$ 所表示的策略组合为(绿色建造, 服务型, 随机抽查), 即服务型业主通过分摊承包商的环保成本等方式, 激励承包商进行绿色建造; 同时, 环保部门采用随机抽查的方式, 避免了与业主环境监督职能的重复并节省了社会资源. 因此, 该策略组合最能反映重大工程的环境效益, 本研究将重点对该组合进行分析. 若要使系统稳定于该状态, 必须满足式(16) 的约束条件.

$$\begin{cases} C_1 - V_1 + bV_1 < 0 \\ mC_1 - L < 0 \\ bG_2 - G_2 - C_3 + bK + bT - tG_1 + btG_1 < 0 \end{cases} \quad (16)$$

表 3 各变量的初始赋值

Table 3 Initial assignment of each variable

变量	R	G ₁	V ₁	C	C ₁	V ₂	L	G ₂	C ₂	m	H	C ₃	F	a	W	b	t	K	T	U
赋值	70	3	18	50	10	20	15	3	8	0.5	5	10	15	0.5	1	0.1	0.4	5	1	2

由图 1 和图 2 可知, 系统 III 最终稳定于(绿色建造、服务型、随机抽查) 的策略组合. 在重大工程建设阶段, 不确定因素对各博弈主体的决策产生影响, 其中业主达到稳定状态的时间较短, 而承包商与环保部门达到稳定状态的时间较长. 由于初始概率反映了各主体参与重大工程绿色管理的初始意

3.3 系统均衡解的确定

由于式(13) ~ 式(15) 为非线性 Itô 型随机微分方程组, 无法直接获得该方程组的解析解, 只能获得其数值解^[36, 37]. 因此, 本研究首先将区间 $[0, T]$ 划分为 N 个子区间且满足 $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{N-1} < t_N = N$ (N 为整数), 其中每个子区间的长度为 $h = T/N$; 节点 $t_n = nh$, 其中 $n \in [1, N]$; 其次, 本研究采用前项 Euler 法(式(17)) 对随机演化系统 II 进行修正, 以获得随机演化系统 III^[38], 如式(18) ~ 式(20) 所示. 通过对其进行数值模拟, 以获得相应的均衡解.

$$x_{n+1} = x_n + h \times f(x_n, t_n) \quad (17)$$

$$x_{n+1} = x_n + h \times [x(\pi_{11} - \overline{\pi_1})] + [Wx(1-x)] \Delta w_n \quad (18)$$

$$y_{n+1} = y_n + h \times [y(\pi_{21} - \overline{\pi_2})] + [Wy(1-y)] \Delta w_n \quad (19)$$

$$z_{n+1} = z_n + h \times [z(\pi_{31} - \overline{\pi_3})] + [Wz(1-z)] \Delta w_n \quad (20)$$

4 数值仿真与分析

为了分析重大工程建设阶段各博弈主体参与绿色管理的策略选择演化过程及各因素的影响效果, 本研究采用 Matlab R2021a 对随机演化系统 III 进行仿真.

4.1 初始概率的影响

各博弈主体的初始概率反映了其初始合作意愿. 为了满足约束条件(16), 本研究对各变量进行初始赋值(见表 3), 并采用仿真方法分析了各博弈主体初始概率变化对系统的影响, 结果如图 1、图 2 所示.

愿, 所以当承包商与业主建立起稳定的绿色管理合作伙伴关系时, 它们能够形成“自组织”并维持在该状态. 此时, 环保部门通过随机抽查即可达到环保监督的目标. 因此, 提升承包商与业主的环保意识、增强其绿色管理合作意愿与粘性, 将有助于重大工程绿色管理的实施.

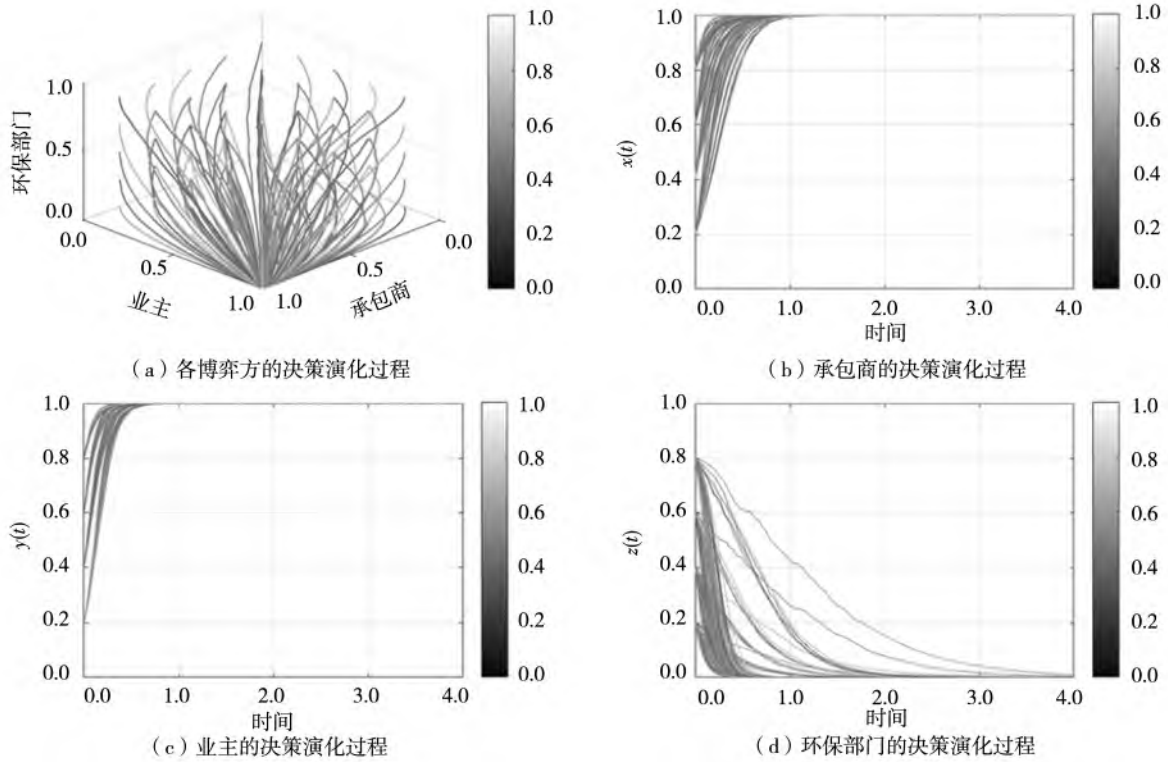


图 1 随机演化系统的整体仿真

Fig.1 Global simulation of stochastic evolution system

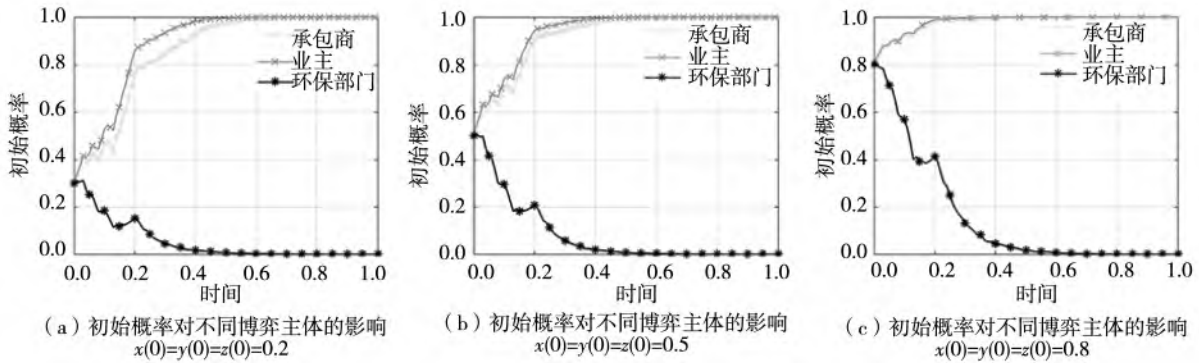


图 2 初始概率对各博弈主体决策的影响

Fig.2 Influence of initial probabilities on decision-making of players

4.2 环保总成本及其分摊比例的影响

为了分析环保总成本 (C_1) 对各主体策略选择的影响,本研究将其视为变量,分别取 5、10 与 15,其他参数保持不变,仿真结果如图 3 所示。

如图 3 所示,在影响方向上, C_1 的增加会延长各主体达到稳定状态的时间;在影响程度上,随着 C_1 的增加,承包商的决策波动较强,而业主与环保部门的决策波动较弱.主要原因如下:重大工程建设是将建筑实体融入原有生态环境系统,进而构建新的“工程-环境复合系统”的过程^[39]。

由于该系统具有复杂性与不确定性等特征,使其绿色管理更为复杂.面对未来可能出现的环境风险,重大工程的环保标准持续提高,直接导致环保总成本的增加.作为工程建设阶段环境问题的首要责任方,承包商必须通过绿色建造来降低施工对环境的影响.因此,环保总成本成为影响承包商决策的关键因素.例如,在港珠澳大桥的建设过程中,承包商必须设置专门的 HSE(health, safety and environment) 部门、配备专业的环保专职人员并购置符合环保质量标准

的大型环保设备.此外,承包商还需根据实际的环保需求与条件,改良大型作业机械、定期进行环保监测(噪音、粉尘等)以及对施工人员进行

环保培训.这些措施的实施直接增加了环保总成本,进而延长了承包商达到稳定状态的时间并加剧了其决策波动.

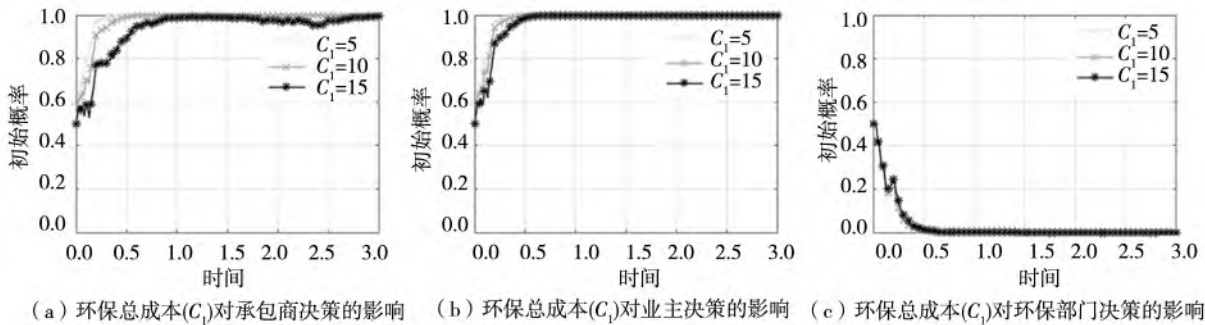


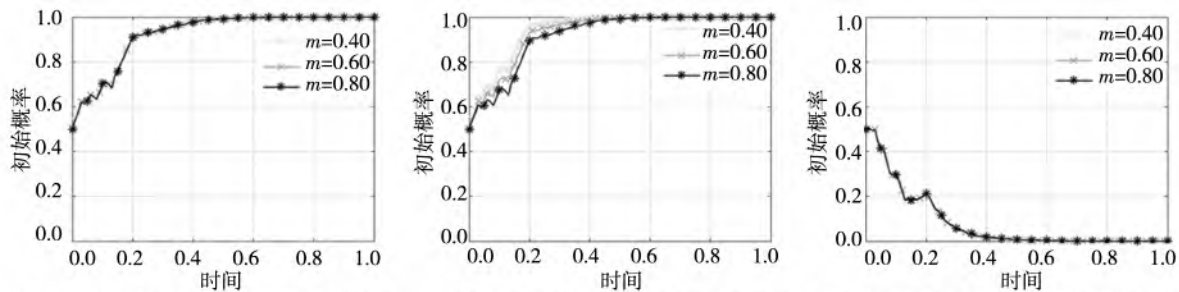
图3 环保总成本(C₁)对各博弈主体决策的影响

Fig. 3 Influence of the total cost of environmental protection (C₁) on decision-making of players

为了分析环保总成本分摊比例(m)对各主体策略选择的影响,本研究将其视为变量,分别取 0.40、0.60 与 0.80,其他参数保持不变,仿真结果如图 4 所示.

金、出资进行环保技术研发并将研发成果分享给承包商等措施,主动分担承包商所面对的高昂环保成本^[40].然而,业主分摊环保成本的比例并非越高越好,因为过高的分摊比例可能导致承包商对业主产生依赖.相比而言,如果业主仍以“管理型”或“监督型”的“强势业主”角色参与重大工程建设,则其对承包商的环保支持将减少,难以激励承包商主动进行绿色建造.因此,在重大工程建设中,业主采用服务型策略可以分担承包商的一部分环保压力与风险,但需要合理控制分摊比例.这不仅有助于业主与承包商建立良好的伙伴关系,以促使承包商主动承担环保责任;而且能够激励承包商主动对绿色建造进行深度优化与革新,同时避免对业主产生依赖,从而更有利于绿色管理的实现.

由图 4 可知,当 m 增加时,业主选择服务型策略的时间延长,而承包商与环保部门的策略选择未受到影响.这表明,有效实施重大工程绿色管理需要业主与承包商的紧密合作,而环保总成本的分摊比例将直接影响这种合作关系的稳定性.以港珠澳大桥为例,组建 HSE 部门、配备专业环保人员、购买环保设备等措施都增加了承包商的环保成本,成为制约其采取绿色建造的关键因素.为了减轻承包商的环保负担,港珠澳大桥管理局采用了服务型业主策略,通过设置专门的 HSE 资



(a)环保总成本分摊比例(m)对承包商决策的影响 (b)环保总成本分摊比例(m)对业主决策的影响 (c)环保总成本分摊比例(m)对环保部门决策的影响

图4 环保总成本分摊比例(m)对各博弈主体决策的影响

Fig. 4 Influence of the allocation proportion of total environmental (m) protection cost on decision-making of players

4.3 社会声誉的影响

为了分析社会声誉(V₁)对各博弈主体策略选择的影响,本研究将其视为变量,分别取 13、18 与 23,而其他参数保持不变,仿真结果如图 5

所示.

由图 5 可知, V₁ 在方向与程度上对承包商与环保部门的决策产生影响,而对业主的决策影响甚微.在方向上, V₁ 的提升加速了承包商选择绿

色建造策略,同时也加速了环保部门选择随机抽查策略;在程度上, V_1 的提升降低了承包商与环保部门决策的波动性.重大工程通常被视为标志性工程,参与建设的承包商多为行业内的标杆企业.在建设过程中,承包商不仅关注工程本身的建设成本,更加关注企业的社会声誉.良好的社会声誉不仅能为企业树立正面的社会形象,还能为企业带来长远的收益并形成难以模仿的竞争优势.然而,良好社会声誉的建立需要企业长期耕耘.因此,承包商社会声誉的提升一方面产生“约束效用”来规制其建设行为,促进绿色建造的实施并降低工程建设对环境的负面影响,以维持现有的

社会声誉水平;另一方面还会产生“激励效用”,通过建设阶段的“零污染”向外界传递企业承担社会责任的信号^[41],进一步提升社会声誉.由此可知,若承包商能够自发地实施绿色建造,环保部门通过随机抽查即可实现监督目标,这将有利于节约监督成本并减少资源浪费.综上,在重大工程实践中,承包商可以通过申请环保专利、加强宣传等方式提升自身的社会声誉;同时,业主也可以利用其资源优势为承包商争取各类环保荣誉,帮助承包商进一步提升社会声誉.这不仅能够激励承包商自发地实施绿色建造,还能节约环保监督成本,实现资源的帕累托改进.

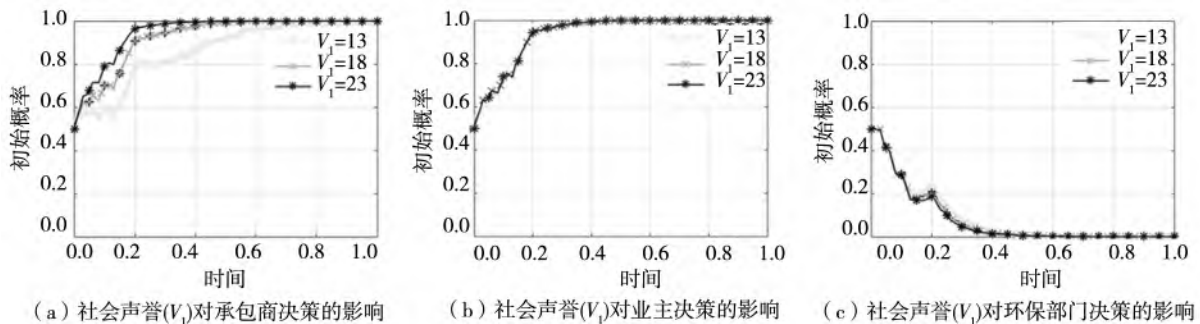


图 5 社会声誉(V_1)对各博弈主体决策的影响

Fig. 5 Influence of social reputation on decision-making of players

4.4 承包商对业主好评的影响

为了分析承包商对业主好评(L)对系统的影

响,本研究将其视为变量并分别取 10、15 与 20 等数值,其他参数则保持不变,仿真结果如图 6 所示.

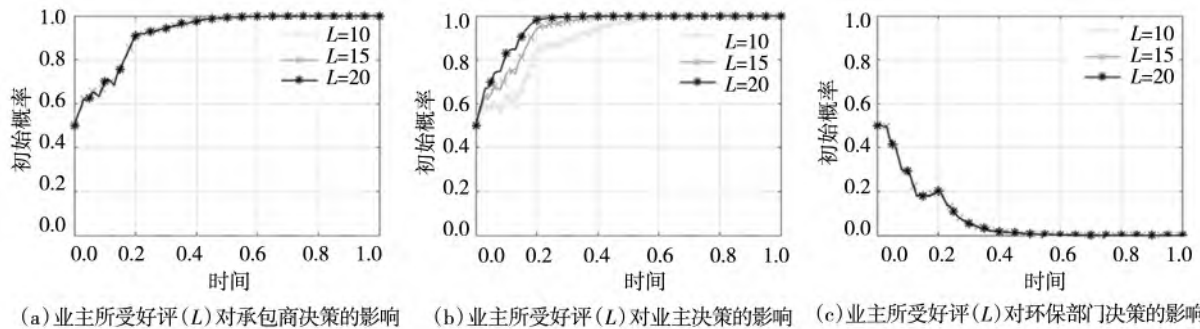


图 6 业主所受好评(L)对各博弈主体决策的影响

Fig. 6 Influence of favorable comments received by the owners (L) on decision-making of players

如图 6 所示,随着 L 的增加,业主更快地选择了服务型策略,而承包商与环保部门的决策受到的影响较小.这是因为承包商对业主的好评与业主实施的各项环保服务措施是相辅相成的.当承包商通过业主的服务型措施减轻了自身的环保压力与风险时,它对业主的满意度将会增加,这反映了业主采取服务型策略的有效性,有助于形成承

包商与业主之间的正反馈机制.以港珠澳大桥为例,高昂的环保成本给承包商带来了巨大的资金压力与风险.港珠澳大桥管理局作为服务型业主,充分考虑了承包商的风险偏好,通过分担环保成本、共享环保技术、为承包商提前办理各类环保手续并为其争取环保荣誉等方式,将原本的“监督与被监督”关系转变为“合作伙伴关系”.这种良

好的关系促使承包商能够主动进行绿色建造,并在施工过程中扩展了有关于白海豚保护与海洋环境污染治理等方面的环保知识、提高了绿色建造工艺并提升了绿色管理水平.这些优质的环保理念、先进的环保技术与高超的管理水平有望被承包商应用于其他工程建设中,并且这还能促进承包商与管理局未来更多的合作,展现出显著的“溢出效应”.因此,提高承包商对业主的好评,有助于加快重大工程业主选择服务型策略,进而推动其由“管理型业主”向“服务型业主”的转型.

4.5 随机扰动产生的影响

为了分析随机扰动(W)对系统的影响,本研究将其视为变量并分别取0.5、1.0与2.0等数值,其他参数则保持不变,仿真结果如图7所示.

由图7可知,随着 W 的增加,承包商与业主达到稳定状态的时间显著缩短;而环保部门达到稳定状态的时间虽未发生改变,但所需时间最长.原因如下:首先,环境信息的不对称性.随机扰动可能增加重大工程突发环境事件的发生概率,承包商与业主作为工程的直接参与者,能够实时跟踪并掌握详尽的环境信息.由于环保部门并不直接参与工程建设,其需要通过监督检查或承包商与业主提供的环境信息进行决策调整.然而,在环境信息获取与传递过程中,存在信息内容失真、信息获取延迟以及信息解读差异等问题,这些因素将延长环保部门调整绿色管理决策的时间.其次,环境风险感知的差异性.当随机扰动增加了重大工程的环境风险时,承包商与业主对环境风险的感知更加直接,而环保部门则更关注环境风险是否会演化为环境问题.当随机扰动突破了建设区域的生态环境阈值并引发突发环境问题时,这将直接导致工程停滞.因此,承包商与业主需要投入

更多资源来预防随机扰动带来的环境影响,则其绿色管理决策调整速度会快于环保部门^[42].最后,绿色管理工作的针对性.承包商与业主基于所掌握的环境信息,能够灵活调整绿色管理策略并制定具有针对性的绿色管理方案;环保部门决策更多依赖于对建设区域内的长期环境评估以及承包商与业主所提供的环境信息,较难同承包商与业主一样针对工程建设的现场情况实时调整绿色管理策略.以港珠澳大桥建设过程中的白海豚保护为例,中国交通建设集团等承包商通过委托专业机构对人工岛、海底沉管隧道等工程现场的水质、沉积物、水下生物等随机因素进行监测并掌握一手环境信息.承包商还采用创新的施工工艺,例如:在施工设备上安装摄像头并通过精细化电脑控制提高施工精度,桥梁工程的大规模预制生产与现场装配式施工等,降低工程建设对白海豚生存环境的影响^[40].港珠澳大桥管理局构建了包含广东珠江口中华白海豚国家级自然保护区管理局、建设单位与施工单位的三级联防机制,实现对环境信息的采集、复核与共享.它还协同中国香港路政署、双方环保顾问和环境监理单位,通过环保联席会议共同制定相应的保护方案^[43].此外,港珠澳大桥管理局将施工现场的环境信息、治理方案等及时上报环保部门,并邀请其共同参与环境治理.由此可知,承包商与业主是预防重大工程建设阶段环境风险的关键主体,同时也是解决与处理突发环境事件的主要责任人;相较于环保部门,它们的决策变化对随机扰动更为敏感.综上,探寻环境事件的发生机理、完善重大工程环保应急预案等管理措施,将有利于降低随机扰动带来的影响,进而保障重大工程绿色管理的实施.

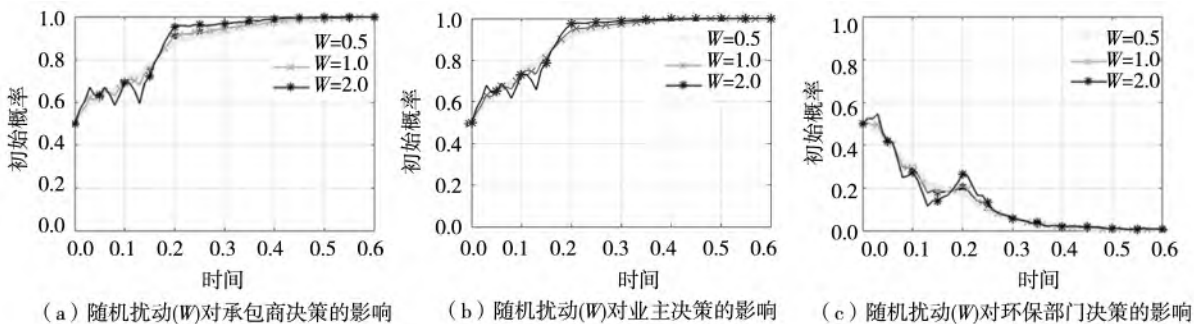


图7 随机扰动(W)对各博弈主体决策的影响

Fig. 7 Influence of stochastic disturbance (W) on decision-making of players

5 结束语

重大工程绿色管理对于减轻工程建设对区域生态环境的影响具有重要作用,但由于工程建设周期长且其对建设区域环境影响的程度难以准确预测,各利益主体参与绿色管理的决策易受到诸多不确定因素的影响。因此,本研究将随机过程融入由承包商、业主与环保部门构成的演化博弈模型中,确定了最优策略组合及其实现条件;并以该策略组合为目标,对随机系统进行仿真,探究了各博弈主体决策的演化过程并揭示不同因素的影响效果。研究发现:(绿色建造、服务型业主、随机抽查)构成了重大工程绿色管理的稳定策略集。提升各博弈主体参与绿色管理的初始合作意愿,有助于降低其决策的波动性,降低环保总成本、合理控制业主分摊环保成本的比例,有利于承包商与业主更快达到绿色管理的稳定状态。同时,提升承包商的社会声誉将促进其主动实施绿色建造,而增加承包商对业主的好评将有助于服务型业主的培育。此外,承包商与业主参与绿色管理的策略选择对随机扰动更为敏感。

5.1 贡献与启示

本研究的贡献主要体现在以下两方面。

其一,在理论方法层面,本研究将随机过程引入演化博弈模型,拓展了重大工程绿色管理的研究方法。以往研究多基于确定性情境展开分析,但由于重大工程建设对环境影响的复杂性与不确定性,有必要将这些不确定因素纳入分析框架。因

此,本研究融合随机过程与演化博弈论,探究了不确定因素影响下多主体参与重大工程绿色管理的策略选择过程,并揭示了关键影响因素的作用效果。这不仅为该领域的研究提供了新思路,而且更贴近现实情景。

其二,在管理实践层面,本研究对服务型业主理念的阐释有助于重新塑造业主与承包商之间的关系,进而在工程实践中推动绿色管理的长效实施。重大工程业主通常具有甲方优势,扮演着“管理者”与“监督者”的角色,较少关注承包商的环境风险偏好,这可能导致承包商缺乏实施绿色建造的主动性与积极性。因此,服务型业主通过分担环保成本、共享绿色技术、提供知识支持等方式,可以重构业主与承包商之间的“伙伴关系”,激发承包商主动承担环境保护责任,并在工程实践中积极推动绿色建造,这将有利于绿色管理的长效实施。

5.2 局限与展望

重大工程绿色管理受到诸多不确定因素影响,导致主体的决策行为可能因为这些因素的类别差异而产生变化。然而,本研究并未深入探索这些不确定因素的异质性。未来可考虑将这些因素进行细分,并根据其特点采用不同的随机过程进行拟合。此外,为了保证重大工程绿色管理实施的稳定性,本研究对仿真数据进行了初始设定。尽管该设定能够满足理论研究的需要,但仍需结合实际案例予以检验。因此,未来研究可针对某一项或某一类重大工程,结合案例研究与问卷调查等方法收集实际数据,以进一步检验本研究的结论。

参考文献:

- [1] 盛昭瀚. 管理: 从系统性到复杂性[J]. 管理科学学报, 2019, 22(3): 2-14.
Sheng Zhaohan. Management: From systematism to complexity[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(3): 2-14. (in Chinese)
- [2] 麦强, 盛昭瀚, 安实, 等. 重大工程管理决策复杂性及复杂性降解原理[J]. 管理科学学报, 2019, 22(8): 17-32.
Mai Qiang, Sheng Zhaohan, An Shi, et al. Complexity and its degradation theory of megaproject management decisions[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(8): 17-32. (in Chinese)
- [3] 曾赛星, 林翰, 马汉阳. 重大基础设施工程社会责任[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Zeng Saixing, Lin Han, Ma Hanyang. Social Responsibility of Major Infrastructure Projects[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [4] Zeng X L, Xiao T X, Xu G C, et al. Comparing the costs and benefits of virgin and urban mining[J]. Journal of Manage-

- ment Science and Engineering, 2022, 7(1): 98–106.
- [5] 盛昭瀚, 于景元. 复杂系统管理: 一个具有中国特色的管理学新领域 [J]. 管理世界, 2021, 37(6): 36–50+2.
Sheng Zhaohan, Yu Jingyuan. Complex systems management: An emerging management science with Chinese characteristics [J]. Management World, 2021, 37(6): 36–50+2. (in Chinese)
- [6] Taylor S R. Green management: The next competitive weapon [J]. Futures, 1992, 24(7): 669–680.
- [7] 王金南, 蒋洪强, 程曦, 等. 关于建立重大工程项目绿色管理制度的思考 [J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 5–12.
Wang Jinnan, Jiang Hongqiang, Cheng Xi, et al. Thoughts on the establishment of green management strategy for major construction projects [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 5–12. (in Chinese)
- [8] 耿海清, 李天威, 徐鹤. 我国开展政策环评的必要性及其基本框架研究 [J]. 中国环境管理, 2019, 11(6): 23–27.
Geng Haiqing, Li Tianwei, Xu He. The necessity and basic framework of China's policy strategic environmental assessment [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(6): 23–27. (in Chinese)
- [9] 宋立旺, 王莎, 钟壬琳. 建设项目水土保持“三同时”执行率评价体系构建 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1): 157–159.
Song Liwang, Wang Sha, Zhong Renlin. Construction of the evaluation system of “Three Simultaneities” implementation rate of soil and water conservation in construction projects [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(S1): 157–159. (in Chinese)
- [10] 杨剑明. 重大工程项目建设的环境管理 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2016.
Yang Jianming. Environmental Management in Mega Construction Projects [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [11] 杨中杰, 朱羽凌. 绿色工程项目管理发展环境分析与对策 [J]. 科技进步与对策, 2017, 34(9): 58–63.
Yang Zhongjie, Zhu Yuling. Analysis on the development environment and countermeasures of green engineering project management [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2017, 34(9): 58–63. (in Chinese)
- [12] 胡桂祥, 张建坤. 绿色工程项目管理及其实施动力研究 [J]. 工程管理学报, 2010, 24(2): 178–181.
Hu Guixiang, Zhang Jiankun. Green engineering project management and its implementation dynamic [J]. Journal of Engineering Management, 2010, 24(2): 178–181. (in Chinese)
- [13] Hwang B G, Ng Wei J. Project management knowledge and skills for green construction: Overcoming challenges [J]. International Journal of Project Management, 2013, 31(2): 272–284.
- [14] Stekelorum R, Laguir I, Gupta S, et al. Green supply chain management practices and third-party logistics providers' performances: A fuzzy-set approach [J]. International Journal of Production Economics, 2021, 235: 1–12.
- [15] Wong C W, Wong C Y, Boon-itt S. Environmental management systems, practices and outcomes: Differences in resource allocation between small and large firms [J]. International Journal of Production Economics, 2020, 228: 1–12.
- [16] 黄凯南. 演化博弈与演化经济学 [J]. 经济研究, 2009, 44(2): 132–145.
Huang Kainan. Evolutionary games and evolutionary economics [J]. Economic Research Journal, 2009, 44(2): 132–145. (in Chinese)
- [17] He Q H, Wang Z L, Wang G, et al. To be green or not to be: How environmental regulations shape contractor greenwashing behaviors in construction projects [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 63: 1–16.
- [18] 周永圣, 梁淑慧, 刘淑芹, 等. 绿色信贷视角下建立绿色供应链的博弈研究 [J]. 管理科学学报, 2017, 20(12): 87–98.
Zhou Yongsheng, Liang Shuhui, Liu Shuqin, et al. The game study of establishing green supply chain from the perspective of green credit [J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(12): 87–98. (in Chinese)
- [19] Friedman D. On economic applications of evolutionary game theory [J]. Journal of Evolutionary Economics, 1998, 8(1): 15–43.
- [20] 刘娜娜, 周国华. 基于前景理论的重大工程协同创新资源共享演化分析 [J]. 管理工程学报, 2023, 37(3): 69–79.
Liu Nana, Zhou Guohua. Evolutionary analysis of resource sharing of collaborative innovation in major infrastructure projects based on prospect theory [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2023, 37(3): 69–79. (in Chinese)

- [21] 吕乐琳, 王卓甫. 数字建造情境下重大工程交易行为监管的协同演化仿真 [J]. 系统管理学报, 2022, 31(3): 440–452.
Lü Lelin, Wang Zhuofu. Co-evolution simulation analysis of transaction behavior supervision for major construction projects under digital construction situation [J]. Journal of Systems & Management, 2022, 31(3): 440–452. (in Chinese)
- [22] Sheng J C, Webber M. Incentive-compatible payments for watershed services along the Eastern Route of China's South-North Water Transfer Project [J]. Ecosystem Services, 2017, 25: 213–226.
- [23] Henriques I, Sadorsky P. The relationship between environmental commitment and managerial perceptions of stakeholder importance [J]. The Academy of Management Journal, 1999, 42(1): 87–99.
- [24] Romestant F. Sustainability agencing: The involvement of stakeholder networks in megaprojects [J]. Industrial Marketing Management, 2020, 89: 535–549.
- [25] Derakhshan R, Turner R, Mancini M. Project governance and stakeholders: A literature review [J]. International Journal of Project Management, 2019, 37(1): 98–116.
- [26] Xue J, Shen Q P, Yang J, et al. Mapping the knowledge domain of stakeholder perspective studies in construction projects: A bibliometric approach [J]. International Journal of Project Management, 2020, 38(6): 313–326.
- [27] Sanderson J. Risk, uncertainty and governance in megaprojects: A critical discussion of alternative explanations [J]. International Journal of Project Management, 2012, 30(4): 432–443.
- [28] Xie L L, Xia B, Hu Y, et al. Public participation performance in public construction projects of South China: A case study of the Guangzhou Games venues construction [J]. International Journal of Project Management, 2017, 35(7): 1391–1401.
- [29] Jeff F. Stakeholder influence strategies [J]. The Academy of Management Review, 1999, 24(2): 191–205.
- [30] 陈志超, 孙绍荣. 基于复杂网络的重大基础设施工程风险管理网络演化模型研究 [J]. 工程管理学报, 2019, 33(3): 98–103.
Chen Zhichao, Sun Shaorong. Research on network evolution model of risk management behavior of major infrastructure projects based on complex network [J]. Journal of Engineering Management, 2019, 33(3): 98–103. (in Chinese)
- [31] 王婧怡, 余金凤, 董 双. 基于 SVN 的重大工程组织安全行为价值网络及驱动路径研究 [J]. 中国管理科学, 2022, 30(5): 275–296.
Wang Jingyi, She Jinfeng, Dong Shuang. Value network analysis and driver paths study for organizational safety behaviors in megaproject based on SVN [J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(5): 275–296. (in Chinese)
- [32] 孙 蕾, 孙绍荣. 基于行为博弈的重大工程网络舆情传播机制研究 [J]. 管理评论, 2021, 33(10): 185–194.
Sun Lei, Sun Shaorong. Network public opinion propagation mechanism of major projects based on behavior game theory [J]. Management Review, 2021, 33(10): 185–194. (in Chinese)
- [33] 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.
Sheng Zhaohan, Xue Xiaolong, An Shi. Constructing theoretical system and discourse system of mega infrastructure construction management with Chinese characteristics [J]. Management World, 2019, 35(4): 2–16+51+195. (in Chinese)
- [34] Vadali S R, Kim E S. Feedback control of tethered satellites using Lyapunov stability theory [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, 14(4): 729–735.
- [35] Friedman D. Evolutionary economics goes mainstream: A review of the theory of learning in games [J]. Journal of Evolutionary Economics, 1998, 8: 423–432.
- [36] 贺一堂, 谢富纪. 产-学研协同创新的随机演化博弈分析 [J]. 管理评论, 2020, 32(6): 150–162.
He Yitang, Xie Fuji. Stochastic evolutionary game analysis on the industry-university-institute collaboration innovation [J]. Management Review, 2020, 32(6): 150–162. (in Chinese)
- [37] 陈 恒, 卢 巍, 杜 蕾. 风险集聚类邻避冲突事件随机演化情景分析 [J]. 中国管理科学, 2020, 28(4): 131–141.
Chen Heng, Lu Wei, Du Lei. Stochastic evolutionary scenario analysis of risk set clustering NIMBY conflicts events [J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(4): 131–141. (in Chinese)
- [38] 胡适耕, 黄乘明, 吴付科. 随机微分方程 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Hu Shigeng, Huang Chengming, Wu Fuke. Stochastic Differential Equations [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [39] 盛昭瀚. 重大工程管理基础理论——源于中国重大工程管理实践的理论思考 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2020.

- Sheng Zhaohan. Fundamental Theories of Mega Infrastructure Construction Management: Theoretical Considerations from Chinese Practices [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2020. (in Chinese)
- [40] Zhu Y L, Zhang J W, Gao X L. Construction management and technical innovation of the main project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2018, 5(1) : 128 – 132.
- [41] Ma H Y, Zeng S X, Lin H, et al. The societal governance of megaproject social responsibility [J]. *International Journal of Project Management*, 2017, 35(7) : 1365 – 1377.
- [42] Cao D, Sun Y R, Chai J, et al. An assessment of China's joint prevention and control policy on sulfur dioxide emissions reduction: A spatial econometric analysis [J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2023, 8(4) : 498 – 511.
- [43] 李 迁, 朱永灵, 刘慧敏, 等. 港珠澳大桥决策治理体系: 原理与实务 [J]. *管理世界*, 2019, 35(4) : 52 – 60 + 159.
- Li Qian, Zhu Yongling, Liu Huimin, et al. Decision governance system of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge: Principles and practices [J]. *Management World*, 2019, 35(4) : 52 – 60 + 159. (in Chinese)

The stochastic evolutionary game of stakeholders' behavior in green management of megaprojects

GAO Xin¹, ZENG Ruo-chen^{2*}, SONG Rui-zhen¹, MENG Xiao-hua³

1. Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
2. SILC Business School, Shanghai University, Shanghai 201899, China;
3. School of Politics and Public Administration, Soochow University, Suzhou 215123, China

Abstract: The green management of megaprojects can mitigate the impact of construction activities on the regional ecological environment. However, given the long construction timelines and the difficulty in accurately predicting potential environmental damage, key stakeholders (i. e. , contractors, owners, and environmental agencies) involved in the green management of the construction phase are susceptible to uncertainties when making green management decisions. This study integrates stochastic processes into evolutionary game theory, reconstructing a stochastic evolutionary game model among contractors, owners, and environmental agencies, exploring the strategic decision-making processes of these stakeholders in green management and analyzing the effects of various factors on their strategic choices. The findings reveal that if contractors adopt green construction, owners pursue service-oriented strategies, and environmental agencies conduct random inspections, a stable strategy set for green management would be achieved in megaprojects. Especially, strengthening the initial willingness of all players to cooperate in green management would effectively reduce decision-making volatility. Additionally, lower total environmental protection costs and a more reasonable proportion of these costs borne by owners could accelerate the achievement of a stable state in green management. Enhancing the social reputation of contractors could incentivize them to adopt green construction strategies, while positive feedback from contractors to owners could foster the development of service-oriented ownership. Moreover, the green management decisions of contractors and owners are particularly sensitive to random disturbances. The stochastic evolutionary game model proposed in this study extends traditional approaches to green management, and the vision of service-oriented ownership provides valuable insights into establishing long-term green management mechanisms in the practices of megaprojects.

Key words: megaprojects; green management; evolutionary game; stochastic process; numerical simulation