

水利基础设施 PPP 项目工期激励策略的三方演化博弈分析

李明^{1,2,3}, 徐蓉^{1,2}

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学项目管理研究所, 江苏 南京 211100;
3. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心, 江苏 南京 211100)

摘要:水利基础设施 PPP 项目建设工期长, 不确定因素多且复杂, 水利基础设施 PPP 项目完工时间会影响公众对政府和建设主体的态度。考虑公众支持意愿对水利基础设施 PPP 项目建设工期的影响, 本研究通过构建由公众、政府和水利基础设施 PPP 项目建设主体组成的三方演化博弈模型, 分析不同情形下的均衡策略演化过程, 并利用 Matlab 进行数值仿真分析。研究结果表明: 在所有可能的均衡策略中, 公众、政府和项目建设方存在四个稳定的策略, 分别是支持, 采取激励措施, 不付出额外努力; 支持, 不采取激励措施, 付出额外努力; 不支持, 采取激励措施, 付出额外努力和支出, 采取激励措施, 付出额外努力。其中, 公众支持能提高政府采取激励措施的积极性, 从而鼓励水利基础设施 PPP 项目建设主体付出额外努力提前完工, 扩大项目效益给公众带来“幸福感”的同时提升政府公信力, 形成三方共赢的良性循环。

关键词:演化博弈; 水利基础设施; PPP; 仿真分析; 工期激励

中图分类号: F274

文献标志码: A

文章编号: 1003-9511(2023)03-0078-09

2020 年我国水利建设投资额创历史新高, 达 7700 亿元, 同比增长 6%。2020 年水利会议上指出将进一步推进重大水利工程建设, 大江大湖治理, 污水改造等基础性治理工程的建设。目前我国水利工程建设投资主要以政府投资为主, 辅以社会资本, 资金来源较为单一。自 2013 年以来, 各部委以及各级地方政府就大力推广 PPP 模式, 通过有资质的水利项目建设方作为贷款主体, 吸引更多信贷资金参与到水利项目建设。所谓 PPP (Public-Private Partnership) 模式, 即实施公私合营, 基于提供产品和服务为出发点, 达成特许权协议, 形成“利益共享、风险共担、全程合作”的合作伙伴关系。PPP 模式能拓宽资金渠道, 激活市场活力, 促进社会资源高效整合。

作为一种公共服务供给的市场化、社会化的改革措施, PPP 模式能比较好地解决政府财政不足以及管理效率低下的问题, 使企业的投资风险更

低^[1-3]。PPP 模式是政府和企业合资, 其中政府的财政收入主要依赖于公众的税收, 建设具有福利性质的公共基础设施, 使纳税人获得“便利性”以及“幸福感”。PPP 项目的付费方式依据付费主体不同可以分为政府付费、使用者付费和可行性缺口补助等三种方式^[4]。政府付费是政府直接付费购买公共产品或服务; 使用者付费是公众付费可以满足社会资本方建设运维 PPP 项目的成本及获取合理收益; 可行性缺口补助是当使用者付费难以覆盖社会资本方回收 PPP 项目建设运维成本和回报时, 由政府给予社会资本方经济补助, 以弥补使用者付费之外的缺口部分^[5]。截至 2020 年 6 月, 国内 PPP 项目中可行性缺口补助和政府付费占比超过 87%, 多数水利基建项目的投资收益低于融资成本, 需要政府额外支持^[6]。但是 PPP 资金投入过多使得地方政府隐性债务化解难度急剧上升^[7]。基于此, 本研究考虑将公众支持作为一种集成融资手段, 以分摊政府对

基金项目: 国家社会科学基金(17BGL156); 住房和城乡建设部 2018 年科学技术项目计划(2018-K8-23); 中央高校基本科研业务费专项(B220207039)

作者简介: 李明(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事项目管理信息化研究。E-mail: lm@hhu.edu.cn

通信作者: 徐蓉(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事项目管理与工程管理研究。E-mail: xurong111298@163.com

水利基础设施 PPP 项目的建设投资。公众是水利基础设施 PPP 项目的使用主体,在项目运营阶段有偿享用水利基础设施 PPP 项目的权益,即公众是 PPP 项目的投资主体之一,若公众愿意将付费时间前置,即在水利基础设施 PPP 项目建设期为政府提供资金支持,则可以有效提升政府财政预算。

目前已有大量研究聚焦于 PPP 模式下水利基础设施项目权益分配的优化,也证明了水利项目应用 PPP 模式的有效性。张云华等^[8]分析了 PPP 水利项目剩余控制权的优化配置模型,提出优化剩余控制权配置的激励约束方法;严景宁等^[9]基于风险分担分析了公益性水利 PPP 项目政府付费模型,优化了政府付费理论体系;丰景春等^[10]在农田水利 PPP 项目运行阶段借助随机博弈模型构建农户和项目主体的两方演化博弈模型。上述研究大多聚焦于 PPP 水利工程的运营期优化,鲜少有研究关注 PPP 水利基础设施项目建设期的优化。PPP 水利基础设施项目建设期长,投资回收期也长,不利风险因素也随之上升,建设期内难免会发生社会资本恶意怠工以增加成本牟取更多利润的情况,为了降低上述情况发生的概率,政府部门一般会采用激励手段来奖励 PPP 项目建设主体缩短建设工期。常金贵等^[11]基于利益相关者贡献度进行利益合理分配,借助 Shapley 值法通过工期激励来提升 PPP 公共项目的建设效率;戚慧娇^[12]和曹启龙等^[13]都主张政府可以通过设置一定的激励措施来促使建设企业缩短工期。在洱海水环境治理 PPP 项目中^[14],社会资本方帮助政府节约 6 亿元成本,同时缩短工期 6 个月。由此可见,政府采取激励措施缩短建设期的同时还能带来经济效益的提升,降低政府付出成本,减少财政负担。缩短 PPP 水利基础设施项目建设工期有利于过程控制、注重结果导向、优化未来运营。首先,缩短 PPP 水利基础设施项目建设工期能提升资金的时间价值,减少资金投入成本和资金占用,同时有利于预防人、材、机随通货膨胀而带来不确定性的增长以及可能发生的政策变化。其次,建设期缩短可以让私营企业尽快进入特许经营期,提升私营企业的利润。最后,建设期缩短能让社会公众更加快速便捷地享受水利基础设施提供的服务。

但有些 PPP 项目建设主体为了赶工期不惜以偷工减料为代价,企业的这种投机行为可能会产生“豆腐渣”工程,严重损害纳税主体的利益。吴正泓等^[15]认为引入纳税人的声誉机制可以减少 PPP 项目建设主体的投机行为。由于 PPP 水利工程大多为公共基础设施,政府用于投入 PPP 项目建设的资

金大多来源于税收收入,同时项目建成结果也关系到纳税人的使用感受,影响社会公众的福利水平。大量研究表明,公众、网络媒体的行为对 PPP 项目的建设以及运营都有正向作用。马光红等^[16]利用三方演化博弈理论,分析了“一带一路”PPP 基础设施项目中影响东道国政府、我国企业和公众三方合作的主要因素;程敏等^[17]将系统动力学与演化博弈相结合,将公众是否参与监督这一行为选择引入到 PPP 项目建设过程中;聂新春^[18]将网络媒体引入博弈模型,建立了网络媒体、企业、政府的三方演化博弈模型,研究表明网络媒体能有效遏制机会主义行为,督促政府认真监管。基于此,本研究将公众支持意愿引入 PPP 水利基础设施项目的建设,构建政府、PPP 项目建设主体以及公众三方利益主体参与的演化博弈模型,对利益相关者三方的策略展开深入分析,旨在寻求缩短 PPP 水利基础设施项目建设期的可行手段。

综上,本研究考虑将公民是否愿意在水利基础设施 PPP 项目中为政府提供支持性资金纳入博弈模型中,建立公众、政府、水利基础设施 PPP 项目建设主体的三方博弈模型,探索依靠公众提供支持性资金这一集成融资的手段来缩短水利基础设施 PPP 项目建设期的可行性,为公共产品供给、城市经济发展、社会资本投资获利提供新视角。

1 模型构建

1.1 参数描述

本研究涉及三方主体参与博弈:分别是公众、政府以及水利基础设施 PPP 项目建设主体(下文简称 PPP 项目建设主体)。其中,公众的策略空间为有支持意愿和无支持意愿;政府的策略空间为采取激励措施和不采取激励措施;PPP 项目建设企业的策略空间为付出额外努力以提前完成和不付出额外努力而如期完成。本研究中 PPP 项目建设企业与社会资本方不是同一主体,PPP 项目建设企业是直接参与水利基础设施 PPP 项目建设的企业,不参与 PPP 项目运营,而社会资本方是与政府共同对水利基础设施 PPP 项目进行投资,并且在项目建设完成后对项目进行运营的主体,在项目运营期内,水利基础设施 PPP 项目产生的收益(如使用者付费等)归社会资本方所有,运营期满后按约定将项目移交给政府,政府对项目绩效进行评定,当使用者付费不足以满足社会资本方成本回收和合理回报时,由政府给予社会资本方可行性缺口补助,以弥补使用者付费之外的缺口部分^[19]。具体参数如表 1 所示。

表 1 参数与说明

参数	意义与说明
x	公众有支持意愿的概率为 x , 则公众无支持意愿的概率为 $1-x, 0 \leq x \leq 1$
y	政府采取激励措施的概率为 y , 则政府不采取激励措施的概率为 $1-y, 0 \leq y \leq 1$
z	项目建设主体付出额外努力以缩短工期的概率为 z , 则项目建设主体不付出额外努力的概率为 $1-z, 0 \leq z \leq 1$
C_1	公众有支持意愿情况下的支持性资金
C_2	政府采取激励措施付出的额外成本
R_n	PPP 项目建设主体如期完成水利基础设施 PPP 项目给所有公众带来的效益
R_g	PPP 项目如期完成政府所获得的收益值
R_p	PPP 项目建设主体如期完成项目时获得的收益值
W_1	有支持意愿公众在水利基础设施 PPP 项目经营提前期内的付费成本(有支持意愿公众弥补政府)
W_2	无支持意愿公众在水利基础设施 PPP 项目经营提前期内的付费成本(无支持意愿公众弥补政府)
W_3	PPP 项目建设主体付出额外努力提前完工获得政府的奖励
W_4	PPP 项目建设主体付出额外努力而获得有支持意愿公众的肯定(声誉)
V_1	PPP 项目建设主体付出额外努力以提前完工需付出的额外成本
V_2	公众支持而政府未采取激励措施, 政府对有支持意愿的公众给予补偿
V_3	PPP 项目建设主体付出额外努力以缩短工期为所有公众带来的增值效益, 其中: $V_3 > W_1; V_3 > (W_1 + C_1); V_2 > C_1; C_1 + W_1 + W_2 > C_2 + W_3$

1.2 模型假设

为了分析三方博弈者通过模仿学习走向稳定策略转变的渐进过程, 分析演化的稳定点及其稳定性, 本研究给出以下假设:

假设 1 假设三个利益主体均为有限理性, 三方均无事先预测能力, 但有事后判断能力。对于提前完工的 PPP 项目, 延长其经营期限, 延长的期限等于其缩短的工程期限^[20], 本研究将延长的经营期限简称为经营提前期。

假设 2 在 PPP 水利基础设施项目建设时, 有 x 概率的公众有意愿支持该水利基础设施 PPP 项目的建设, 公众有支持意愿主要源于以下两点: 其一是水利基础设施 PPP 项目提前完工后带来社会效益的显著提升, 其二是对政府的信任与支持, 然而支持水利基础设施项目这一行为也需承担相应的风险, 如水利基础设施 PPP 项目延误完工、项目经营不善等, 故有 $1-x$ 概率的公众对水利基础设施 PPP 项目的建设采取顺其自然的态度, 没有支持意愿。有支持意愿的公众的支持性资金为 C_1 , 该支持性资金用于支持政府投资水利基础设施 PPP 项目, 减少政府的财政负担, 同时有支持意愿的公众可享有相应的

回报, 如在经营期内可以享受水利基础设施 PPP 项目更优惠的服务价格、更低的费率、更长的服务时间等; 政府部门有 y 的概率采取激励措施以缩短水利基础设施 PPP 项目的建设工期, 有 $1-y$ 的概率不采取激励措施。若政府采取激励措施, 则须支付额外成本 C_2 ; PPP 项目建设主体有 z 的概率选择付出额外努力以缩短建设工期, 有 $1-z$ 的概率选择不付出额外努力按原计划进行施工。其中 $0 \leq x, y, z \leq 1$ 。

假设 3 对于所有公众而言, 项目如期建设完成时获得的收益, 记为 R_n ; 对于政府而言, 项目如期建设完成时获得的收益, 记为 R_g ; 项目建设主体不付出额外努力时完成项目所获收益, 记为 R_p ; 若项目建设主体付出额外努力以提前完工, 需要付出额外的成本, 记为 V_1 , 因为项目建设主体提前完工是需要花费金钱、时间以及技术, 这些都需付出成本。

假设 4 若政府采取激励措施促使项目建设主体付出额外努力提前完工, 水利基础设施 PPP 项目会提前进入经营期, 则有支持意愿的公众在经营提前期内的付费成本, 记为 W_1 , 虽然公众在 PPP 项目经营期内的付费对象是社会资本方, 但在 PPP 项目经营期满进行移交时, 政府所需支付给社会资本方的可行性缺口补助会相应减少; 同理, 无支持意愿的公众也会在经营提前期内产生相应的付费成本, 记为 W_2 , 增加的付费成本会相应降低政府的可行性缺口补助费用; W_1 和 W_2 代表水利基础设施 PPP 项目建设期提前、运营期延长所带来公众付费增加的部分, 均只在政府有作为, 即采取激励措施的情况下才可以抵消政府的可行性缺口补助费用, 若政府不作为, 则公众付费增加部分归社会资本方超额收益, 不弥补政府可行性缺口补助。项目建设主体如果付出额外努力也会获得政府采取的激励措施中 W_3 的经济奖励, 同时还会收获有支持意愿公众的肯定(声誉), 记为 W_4 。

假设 5 若公众有支持意愿而政府不作为, 即未采取激励措施, 则政府需要对有支持意愿公众 V_2 给予一定的补偿; 项目建设主体付出额外努力提前完工可为所有公众带来 V_3 的增值效益, 例如所在区域房产提前增值, 就业量增加。

1.3 模型构建

基于上述假设, 本研究给出 PPP 项目建设过程中, 公众、政府及水利基础设施 PPP 项目建设主体在不同策略下的支付矩阵, 如表 2 所示。

表 2 PPP 项目建设过程中三方策略选择及支付矩阵

公众	政府	水利基础设施 PPP 项目建设主体	
		不付出额外努力 如期完工(1-z)	付出额外努力 提前完工(z)
有支持 意愿 (x)	采取激励 措施(y)	$R_n - C_1$	$R_n - C_1 - W_1 + V_3$
		$R_g - C_2 + C_1$	$R_g - C_2 + W_1 + C_1 - W_3$
	R_p	$R_p - V_1 + W_3 + W_4$	
	不采取激励 措施(1-y)	$R_n - C_1 + V_2$	$R_n - C_1 + V_2 + V_3$
$R_g + C_1 - V_2$		$R_g + C_1 - V_2$	
无支持 意愿 (1-x)	采取激励 措施(y)	R_n	$R_n - W_2 + V_3$
		$R_g - C_2$	$R_g - C_2 + W_2 - W_3$
	R_p	$R_p - V_1 + W_3$	
	不采取激励 措施(1-y)	R_n	$R_n + V_3$
		R_g	R_g
	R_p	$R_p - V_1$	

2 模型求解

2.1 公众的演化稳定策略

设有支持意愿公众和无支持意愿公众的期望收益分别是 U_{11}, U_{12} , 公众的平均收益为 U_1 , 则有:

$$\begin{cases} U_{11} = y(1-z)(R_n - C_1) + \\ yz(R_n - C_1 - W_1 + V_3) + \\ (1-y)(1-z)(R_n - C_1 + V_2) + \\ (1-y)z(R_n - C_1 + V_3 + V_2) \\ U_{12} = y(1-z)R_n + yz(R_n + V_3 - W_2) + \\ (1-y)(1-z)R_n + (1-y)z(R_n + V_3) \\ U_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12} \end{cases} \quad (1)$$

则公众选择策略的复制动态方程为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{11} - U_1) = x(1-x)(U_{11} - U_{12}) = x(1-x)(yz(W_2 - W_1) - C_1 + (1-y)V_2) \quad (2)$$

对 $F(x)$ 求导得,

$$\frac{dF(x)}{dx} = (1-2x)(yz(W_2 - W_1) - C_1 + (1-y)V_2) \quad (3)$$

当 $y = \frac{C_1 - V_2}{z(W_2 - W_1) - V_2}$ 时, $\frac{dF(x)}{dx} = 0$, 此时无论 x 取何值均处于稳定状态。

当 $y > \frac{C_1 - V_2}{z(W_2 - W_1) - V_2}$ 时, 当 $x = 0$ 时, $\frac{dF(x)}{dx} > 0$;

当 $x = 1$ 时, $\frac{dF(x)}{dx} < 0$, 也就是说 $x = 1$ 为三方博弈的均衡点。

当 $y < \frac{C_1 - V_2}{z(W_2 - W_1) - V_2}$ 时, 当 $x = 0$ 时, $\frac{dF(x)}{dx} < 0$;

当 $x = 1$ 时, $\frac{dF(x)}{dx} > 0$, 也就是说 $x = 1$ 为三方博弈的均衡点。

根据公众的演化稳定策略可以得到以下几点

结论:

结论 1 公众有支持意愿的概率随政府采取激励措施概率增加而增加; 公众有支持意愿的概率随水利基础设施 PPP 项目建设主体付出额外努力以提前完工的概率增加而增加。

结论 2 在政府采取激励措施且项目建设主体付出努力提前完工情况下, 无支持意愿公众在项目运营提前期内付费成本与有支持意愿公众在项目运营提前期内付费成本之间的差距越大, 公众支持的概率越高; 有支持意愿的公众支持资金越低, 支持的概率越高。

2.2 政府的演化稳定策略

设政府采取激励措施和不采取激励措施的期望收益分别是 U_{21}, U_{22} , 政府的平均收益为 U_2 , 则有:

$$\begin{cases} U_{21} = x(1-z)(R_g - C_2 + C_1) + \\ xz(R_g - C_2 + C_1 + W_1 - W_3) + \\ (1-x)(1-z)(R_g - C_2) + \\ (1-x)z(R_g - C_2 - W_3 + W_2) \\ U_{22} = x(1-z)(R_g + C_1 - V_2) + \\ xz(R_g + C_1 - V_2) + \\ (1-x)(1-z)R_g + (1-x)zR_g \\ U_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22} \end{cases} \quad (4)$$

则政府选择策略的复制动态方程为

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{21} - U_2) = y(1-y)(U_{21} - U_{22}) = y(1-y)(-C_2 + xV_2 - zW_3 + xzW_1 + W_2(1-x)z) \quad (5)$$

对 $F(y)$ 求导得,

$$\frac{dF(y)}{dy} = (1-2y)(-C_2 + xV_2 - zW_3 + xzW_1 + W_2(1-x)z) \quad (6)$$

当 $x = \frac{C_2 + z(W_3 - W_2)}{z(W_1 - W_2) + V_2}$ 时, $\frac{dF(y)}{dy} = 0$, 此时无论 y

取何值均处于稳定状态。

当 $x > \frac{C_2 + z(W_3 - W_2)}{z(W_1 - W_2) + V_2}$ 时, 当 $y = 0$ 时, $\frac{dF(y)}{dy} > 0$;

当 $y = 1$ 时, $\frac{dF(y)}{dy} < 0$, 也就是说 $y = 1$ 为三方博弈的均衡点。

当 $x < \frac{C_2 + z(W_3 - W_2)}{z(W_1 - W_2) + V_2}$ 时, 当 $y = 0$ 时, $\frac{dF(y)}{dy} < 0$;

当 $y = 1$ 时, $\frac{dF(y)}{dy} > 0$, 也就是说 $y = 0$ 为三方博弈的均衡点。

根据政府的演化稳定策略可以得到以下几点结论:

结论 3 政府采取激励措施的概率随公众支持

概率的增加而增加。

结论 4 政府采取激励措施付出的成本越低则政府采取激励措施的概率越大;政府不采取激励措施所需要支付给有支持意愿公众的补偿越大则政府采取激励措施的概率就越大。

2.3 水利基础设施 PPP 项目建设主体的演化稳定策略

设水利基础设施 PPP 项目建设主体愿意付出额外努力以提前完工和不付出额外努力准时完工的期望收益分别为 U_{31} 、 U_{32} , 则 PPP 项目建设主体的平均收益为 U_3 , 则有:

$$\begin{cases} U_{31} = xy(R_p - V_1 + W_3 + W_4) + x(1-y)(R_p - V_1 + W_4) + \\ (1-x)y(R_p - V_1 + W_3) + (1-x)(1-y)(R_p - V_1) \\ U_{32} = xyR_p + x(1-y)R_p + (1-x)yR_p + (1-x)(1-y)R_p \\ U_3 = zU_{31} + (1-z)U_{32} \end{cases} \quad (7)$$

则 PPP 项目建设主体的复制动态方程为

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(U_{31} - U_3) = z(1-z) \cdot$$

$$(U_{31} - U_{32}) = z(1-z)(yW_3 + xW_4 - V_1) \quad (8)$$

对 $F(z)$ 求导得,

$$\frac{dF(z)}{dz} = (1-2z)(yW_3 + xW_4 - V_1) \quad (9)$$

当 $x = \frac{V_1 - yW_3}{W_4}$ 时, $\frac{dF(z)}{dz} = 0$, 此时无论 z 取何值均处于稳定状态。

当 $x > \frac{V_1 - yW_3}{W_4}$ 时, 当 $z = 0$ 时, $\frac{dF(z)}{dz} > 0$; 当 $z = 1$ 时, $\frac{dF(z)}{dz} < 0$, 也就是说 $z = 1$ 为三方博弈的均衡点。

当 $x < \frac{V_1 - yW_3}{W_4}$ 时, 当 $z = 0$ 时, $\frac{dF(z)}{dz} < 0$; 当 $z = 1$ 时, $\frac{dF(z)}{dz} > 0$, 也就是说 $z = 0$ 为三方博弈的均衡点。

根据 PPP 项目建设主体的演化稳定策略可以得到以下几点结论:

结论 5 PPP 项目建设主体付出额外努力以提前完工的概率随公众有支持意愿概率的增加而增加, 随政府采取激励措施概率的增加而增加。

结论 6 PPP 项目建设主体付出额外努力以提前完工的成本越低, 其付出额外努力的概率就越大; 政府激励企业的经济程度和受公众的舆论影响程度(有支持意愿公众的肯定)越大, 则项目建设主体付出额外努力的概率越大。

$$\begin{cases} F(x) = 0 \\ F(y) = 0 \\ F(z) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据 Ritzberger 等^[20]提出的结论, 所有内部演化轨迹都将无限访问其顶点, 得到其复制动态组的

9 个均衡点, 分别为 $E_1 = (0, 0, 0)$ 、 $E_2 = (1, 0, 0)$ 、 $E_3 = (0, 1, 0)$ 、 $E_4 = (0, 0, 1)$ 、 $E_5 = (1, 1, 0)$ 、 $E_6 = (1, 0, 1)$ 、 $E_7 = (0, 1, 1)$ 、 $E_8 = (1, 1, 1)$ 、 $E_9 = (x^*, y^*, z^*)$ 其中 $E_9 = (x^*, y^*, z^*)$ 是该动力系统的混合策略纳什均衡解, 公式如下:

$$\begin{cases} x^* = \frac{V_1 - yW_3}{W_4} \\ y^* = \frac{C_1 - V_2}{z(W_2 - W_1) - V_2} \\ z^* = \frac{C_2 - xV_2}{x(W_1 - W_2) + W_2 - W_3} \end{cases} \quad (11)$$

根据 Friedman 等^[21]的结论, 雅可比矩阵 J 的特征值为负时, 对应的均衡点为该系演化稳定策略 (ESS)。复制动态方程的雅可比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_3 \\ J_4 & J_5 & J_6 \\ J_7 & J_8 & J_9 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{其中 } J_1 = \frac{\partial F(x)}{\partial x} = (1-2x)(yz(W_2 - W_1) -$$

$$C_1 + (1-y)V_2)$$

$$J_2 = \frac{\partial F(x)}{\partial y} = x(1-x)(z(W_2 - W_1) - V_2)$$

$$J_3 = \frac{\partial F(x)}{\partial z} = x(1-x)y(W_2 - W_1)$$

$$J_4 = \frac{\partial F(y)}{\partial x} = y(1-y)(V_2 + z(W_1 - W_2))$$

$$J_5 = \frac{\partial F(y)}{\partial y} = (1-2y)(-C_2 + xV_2 - zW_3 + xzW_1 + W_2(1-x)z)$$

$$J_6 = \frac{\partial F(y)}{\partial z} = y(1-y)(-W_3 + xW_1 + (1-x)W_2)$$

$$J_7 = \frac{\partial F(z)}{\partial x} = z(1-z)W_4$$

$$J_8 = \frac{\partial F(z)}{\partial y} = z(1-z)W_3$$

$$J_9 = \frac{\partial F(z)}{\partial z} = (1-2z)(yW_3 + xW_4 - V_1)$$

将均衡点代入矩阵 J , 求得各均衡点对应的特征值如表 3 所示。

表 3 各均衡点所对应的特征值

均衡点	特征值 1	特征值 2	特征值 3
$E_1 = (0, 0, 0)$	$-C_1 + V_2 (+)$	$-C_2$	$-V_1$
$E_2 = (1, 0, 0)$	$C_1 - V_2$	$-C_2 + V_2$	$-V_1 + W_4$
$E_3 = (0, 1, 0)$	C_1	$C_2 (+)$	$W_3 - V_1$
$E_4 = (0, 0, 1)$	$-C_1 + V_2$	$-C_2 - W_3 + W_2$	$V_1 (+)$
$E_5 = (1, 1, 0)$	$C_1 (+)$	$C_2 - V_2$	$W_3 + W_4 - V_1$
$E_6 = (1, 0, 1)$	$C_1 - V_2$	$-C_2 + V_2 + W_1 - W_3$	$V_1 - W_4$
$E_7 = (0, 1, 1)$	$-C_1 + W_2 - W_1$	$C_2 + W_3 - W_2$	$V_1 - W_3$
$E_8 = (1, 1, 1)$	$C_1 - W_2 + W_1$	$C_2 - V_2 - W_1 + W_3$	$V_1 - W_4 - W_3$

由表3可知,均衡点 E_1 、 E_3 、 E_4 、 E_5 均存在特征值为正,因此不可能为稳定演化策略,因此仅研究均衡点 $E_2=(1,0,0)$ 、 $E_6=(1,0,1)$ 、 $E_7=(0,1,1)$ 、 $E_8=(1,1,1)$ 。

3 模型演化均衡点分析

3.1 支持、采取激励措施、不付出额外努力的策略分析

当满足 $C_2 > V_2$ 且 $V_1 > W_4$ 时,系统有稳定演化策略 $E_2=(1,0,0)$ 。即当政府采取激励策略付出的成本大于不采取激励策略支付有支持意愿公众的补偿时,政府倾向于“不采取激励策略”;当政府不采取激励措施时,即使项目建设主体付出额外努力也无法收获政府层面的激励,即 $W_3=0$,若项目建设主体付出额外努力所花费的成本大于来自公众的声誉时,项目建设主体倾向于采取“不付出额外努力按期完工”的策略;此时有支持意愿公众的支持性资金小于政府不采取激励措施给予有支持意愿公众的补偿,故公众倾向于采取“支持”策略。

3.2 支持、不采取激励措施、付出额外努力提前完工策略分析

当满足 $-C_2+W_1-W_3+V_2 < 0$ 且 $V_1 < W_4$ 时,系统有稳定演化策略 $E_6=(1,0,1)$ 。即项目建设主体付出额外努力以提前完工所带来的声誉大于其付出额外努力所花费的成本,项目建设主体倾向于采取“付出额外努力提前完工”的策略;政府采取激励措施所付出的额外成本加上支付给项目建设主体付出努力提前完工的奖励,再扣除有支持意愿公众的支持性资金大于政府不采取激励措施所需要支付给有支持意愿公众的补偿时,政府倾向于“不采取激励措施”的策略;有支持意愿公众支付的支持性资金小于其得到的来自政府不采取激励措施的补偿与项目建设主体付出努力提前完工给公众带来效益提升之和时,公众倾向于采取“支持”策略。

3.3 不支持、采取激励措施、付出额外努力提前完工策略分析

当满足 $-C_1-W_1+W_2 < 0$ 、 $C_2-W_2+W_3 < 0$ 且 $-W_3+V_1 < 0$ 时,系统有稳定演化策略 $E_7=(0,1,1)$ 。即项目建设主体付出额外努力提前完工得到政府的奖励大于其付出额外努力所花费的费用时,项目建设主体倾向于采取“付出额外努力以提前完工”策略;当有支持意向公众所需花费的全部成本(包括支持性资金和运营提前期内的付费成本)大于无支持意愿公众在运营提前期内的付费成本时,公众倾向于采取“不支持”策略;当政府采取激励措施所付出的额外成本与支付给项目建设主体付出额外努力以提前完

工的奖励之和小于无支持意愿公众在运营提前期内的付费成本时,政府倾向于“采取激励措施”的策略。

3.4 支持、采取激励措施、付出额外努力提前完工策略分析

当满足 $C_1+W_1-W_2 < 0$ 、 $C_2-V_2+W_3-W_1 < 0$ 且 $-W_3+V_1-W_4 < 0$ 时,系统有稳定演化策略 $E_8=(1,1,1)$ 。即有支持意愿公众付出的成本总和(包括支持性资金和运营提前期内的付费成本)小于无支持意愿公众在运营提前期内的付费成本时,公众倾向于采取“支持”策略;政府采取激励措施所获得的来自有支持意愿公众的支持性资金减去其采取激励措施付出的额外成本与给予建设项目主体的奖励之和大于政府不采取激励措施所需支付给有支持意向公众的补偿时,政府倾向于“采取激励措施”的策略;项目建设主体因付出额外努力提前完工所得到的来自有支持意愿主体的肯定与来自政府的激励奖励之和大于其付出额外努力提前完工的成本时,项目建设主体倾向于采取“付出额外努力以提前完工”的策略。

4 数值仿真

为更直观观察这三方利益相关主体的博弈过程,根据参数的约束条件以及复制动态方程结果,运用 Matlab R2018a 编程,公众、政府以及 PPP 水利基础设施项目主体的演化过程展开数值模拟,以下所有的参数首先满足模型的初始假设条件即: $V_3 > W_1$ 、 $V_3 > (W_1+C_1)$ 、 $V_2 > C_1$ 、 $C_1+W_1+W_2 > C_2+W_3$ 。其中“红色实线”代表公众的演化策略,“蓝色虚线”代表政府演化策略,“绿色*线”代表 PPP 项目建设企业的演化策略。

4.1 均衡点 $E_2=(1,0,0)$ 的仿真分析

对均衡点 $E_2=(1,0,0)$ 点的 $C_2 > V_2$ 、 $V_1 > W_4$ 这一情况进行仿真,仿真初始时间为 0,结束时间为 20。参数复制严格满足约束条件,具体参数取值如表 4 所示。采取“支持”策略的公众占群体比例从 0 到 1,间隔为 0.1;采取“激励措施”策略的政府占群体比例从 0 到 1,间隔为 0.1;采取“付出努力以提前完工”策略的 PPP 项目建设企业占群体比例从 0 到 1,间隔为 0.1。此时,三维仿真的结果如图 1 所示,并从中提取 $x=0.2$ 、 $y=0.4$ 、 $z=0.8$ 单独仿真时间-比率图(图 2):

表 4 均衡点 E_2 具体参数取值

参数	C_1	C_2	R_n	R_g	R_p	W_1
取值	2	5	8	8	7	1
参数	W_2	W_3	W_4	V_1	V_2	V_3
取值	3	0	2	3	4	4

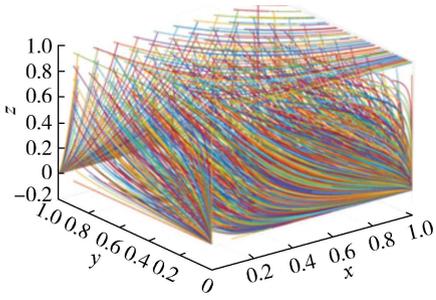


图1 均衡点 $E_2 = (1, 0, 0)$ 演化博弈三维仿真

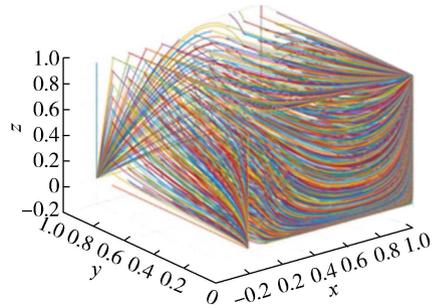


图3 均衡点 $E_6 = (1, 0, 1)$ 演化博弈三维仿真

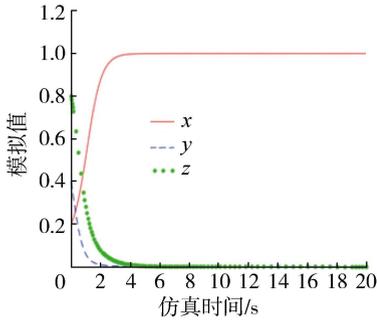


图2 均衡点 $E_2 = (1, 0, 0)$ 时间序列演化博弈仿真

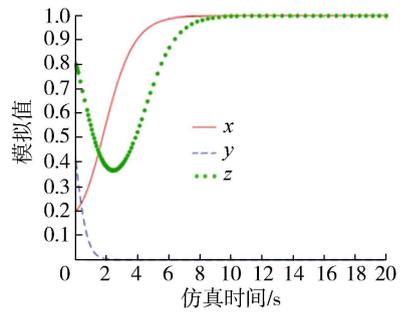


图4 均衡点 $E_6 = (1, 0, 1)$ 时间序列演化博弈仿真

当符合 $C_2 > V_2$ 、 $V_1 > W_4$ 条件时, 公众、政府及 PPP 项目建设企业的策略最终向 $E_2 = (1, 0, 0)$ 进行演化, 并达到稳定, $E_2 = (1, 0, 0)$ 为该演化博弈模型的演化稳定点, 符合 3.1 的分析结果, 说明公众支持性资金这一融资手段难以支撑政府采取激励措施所需支付的额外成本, 导致政府财政增加不足以弥补采取激励手段所需支付的费用, 政府偏好补偿有支持意愿的公众, 没有政府的支持与奖励, PPP 项目建设主体付出额外努力的代价不堪重负。

4.2 均衡点 $E_6 = (1, 0, 1)$ 的仿真分析

对均衡点 $E_6 = (1, 0, 1)$ 点的 $-C_2 + W_1 - W_3 + V_2 < 0$ 、 $V_1 < W_4$ 这一情况进行仿真, 仿真初始时间为 0, 结束时间为 20。参数复制严格满足约束条件, 具体参数取值如表 5 所示。采取“支持”策略的公众占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1; 采取“激励措施”策略的政府占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1; 采取“付出努力以提前完工”策略的 PPP 项目建设企业占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1。此时, 三维仿真的结果如图 3 所示, 并从中提取 $x = 0.2$ 、 $y = 0.4$ 、 $z = 0.8$ 单独仿真时间-比率图(图 4)：

表5 均衡点 E_6 具体参数取值

参数	C_1	C_2	R_n	R_g	R_p	W_1
取值	2	5	8	8	7	1
参数	W_2	W_3	W_4	V_1	V_2	V_3
取值	3	0	3	2	3	4

当符合 $-C_2 + W_1 - W_3 + V_2 < 0$ 、 $V_1 < W_4$ 条件时, 公众、政府及 PPP 项目建设企业的策略最终向 $E_6 =$

$(1, 0, 1)$ 进行演化, 并达到稳定, $E_6 = (1, 0, 1)$ 为该演化博弈模型的演化稳定点, 符合 3.2 的分析结果, 从长远角度出发, PPP 项目建设主体提前完工能得到的声誉可能会为项目主体带来后续的机会和效益, 此时即使没有政府激励措施, 项目主体也愿意付出额外努力来提前完工。公众有意愿为政府提供支持性资金来获取 PPP 项目提前完工带来的潜在效益, 政府采取激励措施的成本高于补偿有支持意愿公众的费用时, 政府会选择不采取激励措施。

4.3 均衡点 $E_7 = (0, 1, 1)$ 的仿真分析

对均衡点 $E_7 = (0, 1, 1)$ 点的 $-C_1 - W_1 + W_2 < 0$ 、 $C_2 - W_2 + W_3 < 0$ 、 $-W_3 + V_1 < 0$ 这一情况进行仿真, 仿真初始时间为 0, 结束时间为 20。参数复制严格满足约束条件, 具体参数取值如表 6 所示。采取“支持”策略的公众占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1; 采取“激励措施”策略的政府占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1; 采取“付出努力以提前完工”策略的 PPP 项目建设企业占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1。此时, 三维仿真的结果如图 5 所示, 并从中提取 $x = 0.2$ 、 $y = 0.4$ 、 $z = 0.8$ 单独仿真时间-比率图(图 6)：

表6 均衡点 E_7 具体参数取值

参数	C_1	C_2	R_n	R_g	R_p	W_1
取值	5	2	8	8	7	1
参数	W_2	W_3	W_4	V_1	V_2	V_3
取值	5	2	0	1	6	7

当符合 $-C_1 - W_1 + W_2 < 0$ 、 $C_2 - W_2 + W_3 < 0$ 、 $-W_3 + V_1 < 0$ 条件时, 公众、政府及 PPP 项目建设企业的策略最

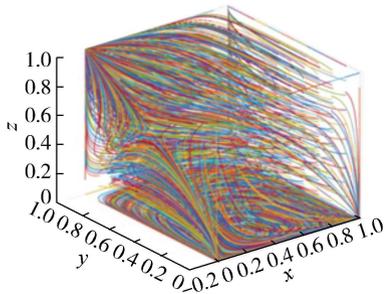


图5 均衡点 $E_7 = (0, 1, 1)$ 演化博弈三维仿真

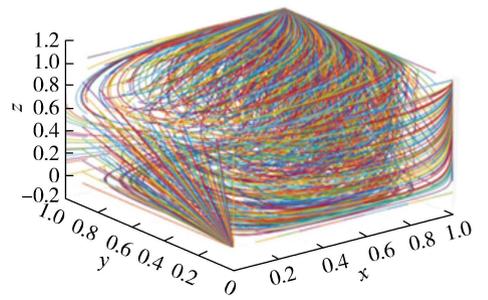


图7 均衡点 $E_8 = (1, 1, 1)$ 演化博弈三维仿真

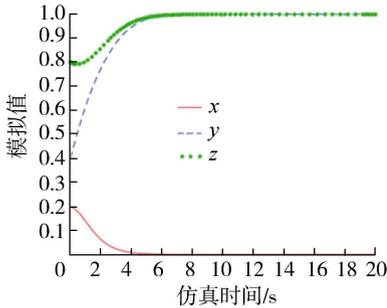


图6 均衡点 $E_7 = (0, 1, 1)$ 时间序列演化博弈仿真

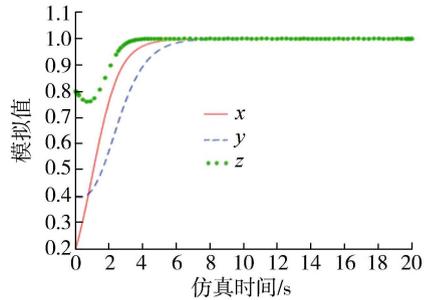


图8 均衡点 $E_8 = (1, 1, 1)$ 时间序列演化博弈仿真

终向 $E_7 = (0, 1, 1)$ 进行演化, 并达到稳定, $E_7 = (0, 1, 1)$ 为该演化博弈模型的演化稳定点, 符合上文 3.3 的分析结果, 由于政府的激励措施诱惑力较大, PPP 项目建设主体愿意付出额外努力来促使项目提前完工。当公众所需付出的成本高于项目带来的回报时, 公众不愿支持水利基础设施 PPP 项目的建设。对政府来说, 政府采取激励措施最终实现 PPP 项目提前完工带来的效益 (来自无支持意愿公众在运营提前期内的付费补偿) 高于付出的成本时, 政府愿意采取激励措施。

4.4 均衡点 $E_8 = (1, 1, 1)$ 的仿真分析

对均衡点 $E_8 = (1, 1, 1)$ 点的 $C_1 + W_1 - W_2 < 0$ 、 $C_2 - V_2 + W_3 - W_1 < 0$ 、 $-W_3 + V_1 - W_4 < 0$ 这一情况进行仿真, 仿真初始时间为 0, 结束时间为 20。参数复制严格满足约束条件, 具体参数取值如表 7 所示。采取“支持”策略的公众占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1; 采取“激励措施”策略的政府占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1; 采取“付出努力以提前完工”策略的 PPP 项目建设企业占群体比例从 0 到 1, 间隔为 0.1。此时, 三维仿真的结果如图 7 所示, 并从中提取 $x = 0.2$ 、 $y = 0.4$ 、 $z = 0.8$ 单独仿真时间-比率图 (图 8):

表 7 均衡点 E_8 具体参数取值

参数	C_1	C_2	R_n	R_g	R_p	W_1
取值	2	2	8	8	7	1
参数	W_2	W_3	W_4	V_1	V_2	V_3
取值	4	2	3	2	4	6

当符合 $C_1 + W_1 - W_2 < 0$ 、 $C_2 - V_2 + W_3 - W_1 < 0$ 、 $-W_3 +$

$V_1 - W_4 < 0$ 条件时, 公众、政府及 PPP 项目建设企业的策略最终向 $E_8 = (1, 1, 1)$ 进行演化, 并达到稳定, $E_8 = (1, 1, 1)$ 为该演化博弈模型的演化稳定点, 符合上文 3.4 的分析结果, 此时公众、政府、PPP 项目建设主体三方实现共赢, 公众愿意通过支持性资金为政府带来融资, 政府采取税收激励措施鼓励 PPP 项目建设主体付出额外努力提前完工, 不仅能延长 PPP 项目运营期限, 还能增强 PPP 项目建设主体的声誉, 提升政府公信力水平, 公众也能更早的享受到水利基础设施 PPP 项目所带来的便利。

5 结论与对策分析

5.1 结论

本研究针对水利基础设施 PPP 项目的建设工期激励问题, 通过引入公众这一利益相关者, 借助演化博弈, 构建了公众、政府和水利基础设施 PPP 项目建设主体三方演化博弈模型, 利用复制动态方程分析了该三维动力系统的动态复制过程及四种演化稳定策略的影响因素可知, 在该三维动力系统中, 利益相关者的行为策略彼此牵制, 互相影响, 具体而言:

就公众而言, 政府采取激励措施的概率越高, 公众支持的概率也就越高, 这也表现为公众对政府有所作为的肯定。项目建设主体付出额外努力以提前完工的概率越大, 给公众带来的社会效益越大, 公众支持意愿也随之上升, 这是公众感知自己投资变现的过程。

就政府而言, 项目建设主体付出额外努力提前完工的概率越大, 则政府采取激励措施的概率就越大, 项目建设提前完工能给政府带来声望和信誉, 进

而愿意激励企业付出努力。而公众支持概率越大,使政府可以获得足够的财政收入进而采取激励措施;而如果政府在公众支持的情况下未采取激励措施,会引起有支持意愿公众的不满,此时政府不仅要补偿有支持意愿的公众,还可能影响后续公众参与PPP项目的积极性与遵从度,从而形成恶性循环。

对于水利基础设施PPP项目建设主体来说,项目建设主体付出努力提前完工虽然需要付出一定的额外成本,但在政府激励概率较大的情况下,项目建设主体愿意付出努力提前完工,因为此时项目建设主体不仅会得到来自政府的经济激励,还会得到有支持意愿公众的肯定,对企业良好形象的塑造有积极影响。

5.2 对策分析

对于公众而言,一方面公众要积极支持政府的决策,在必要时可以为政府提供资金支持,这是保证政府财政收入的一种融资手段,也是督促政府设置合理的激励措施的“催化剂”。同时公众要发挥舆论作用,在PPP项目建设主体提前完工时给予充分的肯定,提升企业的社会价值;另一方面,公众要发挥主体作用,加大对政府不作为的索偿力度,从而抑制政府“拿钱不办事”的懒惰行为。

就政府而言,政府要制定详细的激励措施,抓住项目建设主体的“激励痛点”制定出有效的激励措施,例如设置税收优惠、补贴政策等。与此同时,政府还需加强对项目建设主体的监督与管理,减少项目建设主体以损害工程质量为前提的缩短项目工期的行为,遏制机会主义行为。树立政府自身的威信,保障公众的权益,支持性资金应专款专用,对于公众的支持应以给予合理的回报,提升PPP项目的服务水平,在保障所有公众合理权益的同时,适当区分有支持意愿公众和无支持意愿公众之间享受权益的区别,增加社会公平,维护社会和谐。

就水利基础设施PPP项目建设主体而言,要加大内部管理和技术创新,尽可能优化项目方案、减少成本以缩短水利基础设施PPP项目的建设工期,同时一定要在保证项目质量的前提下优化工期,切不可偷工减料,履行企业社会责任,保证付费公众的基本效益,这样才可以获得政府的激励,赢得公众的肯定,才会对整个企业的经济绩效和社会绩效的显著提升产生作用。

参考文献:

[1] TAN Z. Capacity and toll choice of an add-on toll road under various ownership regimes [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012,48(6):1080-1092.

[2] 张禄,石磊,戴大双,等. PPP项目政府担保对项目效率影响研究[J]. 中国管理科学,2017,25(8):89-102.

[3] 吴孝灵,刘小峰,周晶,等. 基于私人过度自信的PPP项目最优补偿契约设计与选择[J]. 中国管理科学,2016,24(11):29-39.

[4] 魏春飞. PPP模式在我国的发展及建议[J]. 青海金融,2018,328(1):30-32.

[5] 张德刚,薛秋阳. 林业PPP项目分类以及回报机制探索[J]. 林业经济,2018,40(5):91-96.

[6] 星焱. 公募REITs支持新型城镇化:机理、问题与对策[J]. 证券市场导报,2021,345(4):12-19.

[7] 陈昌盛,李承健,江宇. 面向国家治理体系和治理能力现代化的财税改革框架研究[J]. 管理世界,2019,35(7):8-14,77.

[8] 张云华,丰景春,薛松. 水利基础设施PPP项目剩余控制权优化配置模型[J]. 科技管理研究,2017,37(1):189-193.

[9] 严景宁,郭华平. 公益性水利PPP项目政府付费模型及应用:基于风险分担视角[J]. 价格理论与实践,2017,401(11):114-117.

[10] 丰景春,姚健辉,张可. 农田水利PPP项目的运行机制:基于随机演化博弈[J]. 技术经济,2018,37(1):68-75.

[11] 常金贵,罗福周,刘静. 公共建设项目工期管理激励机制设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(3):449-453.

[12] 戚慧娇. 政府投资项目代建模式激励机制研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.

[13] 曹启龙,盛昭瀚,周晶,等. 公平偏好下PP项目多任务激励问题研究[J]. 预测,2016,35(1):75-80.

[14] 张璐晶. 洱海水环境治理PPP项目实施:社会资本方帮政府节省约6亿元,缩短工期6个月[J]. 中国经济周刊,2016,620(20):21-22.

[15] 吴正泓,陈通,张保银. 间接互惠下公共文化PPP项目机会主义行为[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2016,18(6):80-84.

[16] 马光红,鲍毓奕,单而芳. 基于演化博弈的“一带一路”PPP基础设施合作稳定性分析[J]. 上海大学学报(自然科学版),2019,25(4):612-629.

[17] 程敏,刘亚群,王洪强. 基于系统动力学的邻避设施PPP项目三方演化博弈分析[J]. 运筹与管理,2019,28(10):40-49.

[18] 聂新春. PPP模式付费机制研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.

[19] 杨彬权,王周户. 论我国PPP行政法制规框架之构建[J]. 河北法学,2018,36(3):98-117.

[20] RITZBERGER K, WEIBULL J W. Evolutionary selection in normal-form games [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1995:1371-1399.

[21] FRIEDMAN D. A simple testable model of double auction markets[J]. Journal of Economic Behavior & Organization, 1991,15(1):47-70.

(收稿日期:2022-11-24 编辑:高虹)