

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202212004



水环境治理 PPP 项目的 多主体行为演化博弈

宋文洁, 詹朝曦

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于水环境治理 PPP 项目多主体不同策略组合下的收益函数, 构建政府主体、经济主体和社会主体多主体演化博弈模型, 并通过 MATLAB 软件进行数值模拟和参数敏感性分析. 结果表明: 在一定条件下复制动态系统可以达到积极规制, 自主推进, 主动参与的理想稳定状态; 激励措施可以加快自主推进、主动参与策略收敛速度, 但激励强度并非越强越好; 演化稳定策略受惩罚力度和损失系数 γ 影响, 对损失系数 β 不敏感.

关键词: 水环境治理; PPP 模式; 演化博弈; 利益相关者; 政府规制

中图分类号: X 522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)02-0233-10

Multi-Agent Behavior Evolutionary Game of Water Environment Treatment PPP Projects

SONG Wenjie, ZHAN Zhaoxi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the income function of water environment treatment PPP projects under different strategy combinations of multi-agent, a multi-agent evolutionary game model was established among government agent, economic agent and social agent, and numerical simulation and parameter sensitivity analysis were carried out by MATLAB software. The results show that the replication dynamic system can achieve the ideal stable state of active regulation, independent promotion and active participation under certain conditions. The incentive measures can accelerate convergence speed of autonomous promotion and active participation strategies, but the incentive intensity is not as better as it gets stronger. The evolution stability strategy is affected by penalty intensity and loss coefficient γ , but it isn't insensitive to loss coefficient β .

Keywords: water environment treatment; PPP model; evolutionary game; stakeholders; government regulation

在构建人与自然生命共同体背景下,生态修复、河道整治、污水治理等水环境综合治理是当前乃至未来我国环境保护的重要工作之一,但是巨额投资和复杂治理技术使项目治理陷入困境^[1]. 政府和社会资本合作(PPP)模式的应用为水环境治理提供了新的融资途径^[2], 在应用前沿科技^[3]和先进管理模式^[4]的同时,破解了项目建设资金的瓶颈问题. 然而,水环境治理 PPP 项目在实施过程中,仍存在项目参与主体不同利益诉求和利益冲突的共性,影响项目治理绩效^[5].

现有研究指出,识别治理项目的主要利益相关者及其层次关系和互相影响程度^[6-7],并将利益相关

收稿日期: 2022-12-29

通信作者: 詹朝曦(1970-),男,副教授,博士,主要从事建筑经济、工程管理的研究. E-mail: 75963701@qq.com.

基金项目: 国家社科基金一般资助项目(21BZZ069);福建省软科学创新战略研究项目(2021R0056)

者之间的利益诉求纳入决策是提高治理成效和实现可持续性目标的关键^[8]. 在水环境治理过程中,通过采用网络化治理手段,强调了地方政府在水环境治理中的主导作用,但政府过多干预并不利于环境治理效益的提升^[9]. 为了加强共同管理、提升治理成效,应权衡不同利益相关者之间的利益诉求^[10]. 有学者应用演化博弈理论分析不同群体之间的互动机制^[11],探索利益主体利益博弈及策略选择的动态过程. 通过对政府间、企业间、政府与企业间等主体行为分析,认为政府的监管成本、力度以及惩罚值是影响系统稳定策略的关键^[12],当政府和社会资本积极合作获得较高收益时,可以实现主体间合作共赢^[13]. 现有研究肯定了政府的主导作用和项目主体之间的博弈行为对治理绩效的影响,但是忽视了多元利益主体之间的行为博弈和影响因素分析,尤其是对公众、营利性设施使用者等社会主体的利益诉求缺乏深入分析. 社会主体作为特殊的利益相关者群体,是水环境治理效果的直接感受者和受益者^[14],在动态考量水环境治理 PPP 项目多主体间的利益关系与行为博弈时,理应纳入分析框架. 当前有少数学者对水环境治理 PPP 项目多主体行为博弈展开了研究,但也仅是从价值共创^[15] 角度去探索博弈主体对环境治理公私合作项目的影 响,而如何将政府规制与外部机制相结合研究水环境治理 PPP 项目的演化博弈问题尚未涉及. 基于此,本文对水环境治理 PPP 项目多主体在政府规制下策略选择的作用机理和演化路径进行研究.

1 策略分析与模型假设

1.1 演化博弈主体与行动策略分析

水环境治理 PPP 项目主要涉及政府主体、经济主体、社会主体等 3 大主体,在不考虑其他约束情况下,将政府主体、经济主体和社会主体视为 1 个完整的系统,该系统中 3 个主体是有限理性的,不受外在因素影响,仅分析博弈主体的现有行为策略.

在水环境治理 PPP 项目实施过程中,政府发挥着主导作用,此主导作用有异于传统政府的“大包大揽”,而是政府在解决水环境污染问题上担负主要责任,是不可轻忽的主导力量,把控着项目的总体利益. 首先,政府是政策制度和规则的制定者. 我国水环境污染防治和水环境保护自觉意识尚未形成,PPP 模式引入水环境治理领域的时间也较短,强化规制制度建设对我国水环境治理 PPP 项目的推进至关重要,而水环境治理 PPP 项目的复杂性也决定了此类项目需要制度和规则作为强有力的后盾. 其次,政府是监督者和管理者. 政府作为水环境治理 PPP 项目的主要参与主体,具有不可推卸的监督与管理职责. 因此,在积极规制的情况下,政府主体通过环保宣传、政策优惠、专项资金或补贴等^[16] 激励和扶持措施激发经济主体和社会主体的积极性和自主性. 然而,政府主体通过利益权衡或者仅是为了政绩需求,可能会处于消极规制状态,未给予项目过多关注和经济补贴.

水环境治理 PPP 项目的经济主体主要为社会资本和项目公司,与政府主体构成合作伙伴关系. 作为典型的“经济人”,获得合理的经济效益是经济主体参与治理项目的首要考虑因素. 随着社会环境保护意识的增强,社会认可度和公司形象成为企业的核心竞争力之一,经济主体会根据项目成本、项目收益、风险预测及政府支持力度投资水环境治理 PPP 项目. 在政府规制下,经济主体为获得更多补贴,积极落实各项制度政策,配合政府工作做好项目推进. 然而,经济主体自身“经济人”的属性可能会使其采取非合作行为或投机行为^[17],未按照合同约定或违背谨慎工程和运营惯例,被动地去完成水环境治理任务.

水环境治理 PPP 项目的社会主体主要为周边群众和营利性设施使用者. 水环境问题与社会主体联系紧密,直接影响着周边群众的日常生活质量,社会主体参与环境治理也是社会发展的必然趋势,《环境保护公众参与办法》《环境影响评价法》《水污染防治法》等法律条文也明确了群众参与环境影响评价、水污染防治等生态环境治理的权力. 不同于政府主体和经济主体,社会主体在项目治理中既无确切的工作任务,也无实质的资金投入. 然而,社会主体作为水环境治理效果的直接感受者和受益者,为了维护赖以生存的自然环境,维护自身合法利益,社会主体会主动参与水环境治理项目,但也存在社会主体基于多一事不如少一事的原则而选择置身事外的可能.

1.2 模型的基本假设

假设 1:政府主体策略集合为{积极规制,消极规制},经济主体策略集合为{自主推进,被动履责},社会主体策略集合为{主动参与,不参与}. 分别用 x,y,z 表示政府主体、经济主体和社会主体选择积极

规制、自主推进和主动参与策略的概率, $x, y, z \in [0, 1]$ 且均为时间 (t) 的函数; 分别用 $(1-x), (1-y), (1-z)$ 表示政府主体、经济主体和社会主体选择消极规制、被动履责和不参与策略的概率。

假设 2: 水环境治理 PPP 项目自身给政府主体带来的基本经济效益为 R_1 , 基本成本为 C_1 ; 政府主体选择积极规制策略时, 可获得额外收益 E_1 , 需要额外付出成本 B_1 ($E_1 > B_1$); 对选择自主推进策略的经济主体提供税收优惠和经济补贴(激励强度), 记为 J_1 ; 对选择主动参与策略的社会主体给予奖励, 记为 J_2 ; 对不配合政府工作的经济主体进行处罚, 记为 K_1 ; 当政府主体采取消极规制策略时, 因经济主体被动履责而导致不可预见风险发生而带来的损失, 记为 S_1 。

假设 3: 水环境治理 PPP 项目自身给经济主体带来的基本经济效益为 R_2 , 基本成本为 C_2 ; 当经济主体选择自主推进策略时, 可获得额外收益 E_2 , 需要额外付出成本 B_2 ($E_2 > B_2$); 当社会主体选择不参与策略, 经济主体选择自主推进策略时给本方带来的损失 L_1 的概率(损失系数), 记为 γ ; 当社会主体选择主动参与策略, 经济主体选择被动履责策略时, 会带来损失 S_2 。

假设 4: 水环境治理 PPP 项目自身给社会主体带来的基本经济效益为 R_3 ; 当社会主体选择主动参与策略时, 可获得额外收益 E_3 , 需要付出成本 C_3 ; 当经济主体选择被动履责策略, 社会主体选择主动参与策略时给本方带来的损失 L_2 的概率, 记为 β ; 当经济主体选择自主推进策略, 社会主体选择不参与策略时, 会带来损失 S_3 。

考虑到一方主体因另外两方主体采取正向行为时会获得额外的经济效益, 设 $n, m, g \in (0, 1)$ 分别为政府主体、经济主体、社会主体的收益系数, 令政府主体因经济主体和社会主体都采取正向行为获得的额外经济效益为 $n(R_2 + R_3)$; 经济主体因政府主体和社会主体都采取正向行为获得的额外经济效益为 $m(R_1 + R_3)$; 社会主体因政府主体和经济主体都采取正向行为获得的额外经济效益为 $g(R_1 + R_2)$ 。

2 多主体演化博弈模型的构建

2.1 模型的构建

基于假设 1~4, 水环境治理 PPP 项目中政府主体、经济主体、社会主体的策略选择可形成 8 个策略组合, 即 $G_1 = \{\text{积极规制, 自主推进, 主动参与}\}, G_2 = \{\text{积极规制, 自主推进, 不参与}\}, G_3 = \{\text{积极规制, 被动履责, 主动参与}\}, G_4 = \{\text{积极规制, 被动履责, 不参与}\}, G_5 = \{\text{消极规制, 自主推进, 主动参与}\}, G_6 = \{\text{消极规制, 自主推进, 不参与}\}, G_7 = \{\text{消极规制, 被动履责, 主动参与}\}, G_8 = \{\text{消极规制, 被动履责, 不参与}\}$ 。结合模型的基本假设, 可得多主体演化博弈收益情况, 如表 1 所示。

表 1 多主体演化博弈收益情况
Tab. 1 Income of multi-agent evolutionary game

策略组合	政府主体收益	经济主体收益	社会主体收益
G_1	$R_1 - C_1 + E_1 - B_1 - J_1 - J_2 + n(R_2 + R_3)$	$R_2 - C_2 + E_2 - B_2 + J_1 + m(R_1 + R_3)$	$R_3 + E_3 - C_3 + J_2 + g(R_1 + R_2)$
G_2	$R_1 - C_1 + E_1 - B_1 - J_1$	$R_2 - C_2 + E_2 - B_2 + J_1 - \gamma L_1$	$g(R_1 + R_2) + R_3 - S_3$
G_3	$R_1 - C_1 + E_1 - B_1 + K_1 - J_2$	$R_2 - C_2 - K_1 - S_2 + m(R_1 + R_3)$	$R_3 + E_3 - C_3 + J_2 - \beta L_2$
G_4	$R_1 - C_1 + E_1 - B_1 + K_1$	$R_2 - C_2 - K_1$	R_3
G_5	$R_1 - C_1 + n(R_2 + R_3)$	$R_2 - C_2 + E_2 - B_2$	$R_3 + E_3 - C_3$
G_6	$R_1 - C_1$	$R_2 - C_2 + E_2 - B_2 - \gamma L_1$	$R_3 - S_3$
G_7	$R_1 - C_1 - S_1$	$R_2 - C_2 - S_2$	$R_3 + E_3 - C_3 - \beta L_2$
G_8	$R_1 - C_1 - S_1$	$R_2 - C_2$	R_3

在水环境治理 PPP 项目中, 设政府主体采用积极规制策略时的期望收益为 U_1^x , 采用消极规制策略时期望收益为 U_1^{1-x} , 平均期望收益为 \bar{U}_1 , 则 $U_1^x, U_1^{1-x}, \bar{U}_1$ 分别为

$$U_1^x = zy[R_1 - C_1 + E_1 - B_1 - J_1 - J_2 + n(R_2 + R_3)] + y(1-z)(R_1 - C_1 + E_1 - B_1 - J_1) + z(1-y)(R_1 - C_1 + E_1 - B_1 + K_1 - J_2) + (1-y)(1-z)(R_1 - C_1 + E_1 - B_1 + K_1), \quad (1)$$

$$U_1^{1-x} = zy[R_1 - C_1 + n(R_2 + R_3)] + y(1-z)(R_1 - C_1) + z(1-y)(R_1 - C_1 - S_1) + (1-y)(1-z)(R_1 - C_1 - S_1), \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\overline{U}_1 &= xU_1^x + (1-x)U_1^{1-x} = R_1 - C_1 - S_1 + x(E_1 + K_1 + S_1 - B_1) + \\ &\quad yS_1 - xy(J_1 + K_1 + S_1) - xzJ_2 + nyz(R_2 + R_3).\end{aligned}\tag{3}$$

根据 Malthusian 方程^[18], 水环境治理 PPP 项目政府主体复制动态方程 $W(x)$ 为

$$W(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_1^x - \overline{U}_1) = x(1-x)[E_1 - B_1 + K_1 + S_1 - y(J_1 + K_1 + S_1) - zJ_2].\tag{4}$$

在水环境治理 PPP 项目中, 设经济主体采用自主推进策略时的期望收益为 U_2^y , 采用被动履责策略时的期望收益为 U_2^{1-y} , 平均期望收益为 \overline{U}_2 , 可得 $U_2^y, U_2^{1-y}, \overline{U}_2$ 分别为

$$U_2^y = xz[R_2 - C_2 + E_2 - B_2 + J_1 + m(R_1 + R_3)] + x(1-z)(R_2 - C_2 + E_2 - B_2 + J_1 - \gamma L_1) + z(1-x)(R_2 - C_2 + E_2 - B_2) + (1-x)(1-z)(R_2 - C_2 + E_2 - B_2 - \gamma L_1),\tag{5}$$

$$U_2^{1-y} = xz[R_2 - C_2 - K_1 - S_2 + m(R_1 + R_3)] + x(1-z)(R_2 - C_2 - K_1) + z(1-x)(R_2 - C_2 - S_2) + (1-x)(1-z)(R_2 - C_2),\tag{6}$$

$$\begin{aligned}\overline{U}_2 &= yU_2^y + (1-y)U_2^{1-y} = R_2 - C_2 + y(E_2 - B_2 - \gamma L_1) + \\ &\quad xy(J_1 + K_1) + yz(S_2 + \gamma L_1) + mxz(R_1 + R_3) - xK_1 - zS_2.\end{aligned}\tag{7}$$

同理, 水环境治理 PPP 项目经济主体复制动态方程 $W(y)$ 为

$$W(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_2^y - \overline{U}_2) = y(1-y)[E_2 - B_2 + x(J_1 + K_1) + z(S_2 + \gamma L_1) - \gamma L_1].\tag{8}$$

在水环境治理 PPP 项目中, 设社会主体采用主动参与策略时的期望收益为 U_3^z , 采用不参与策略时的期望收益为 U_3^{1-z} , 平均期望收益为 \overline{U}_3 , 可得 $U_3^z, U_3^{1-z}, \overline{U}_3$ 分别为

$$U_3^z = xy[R_3 + E_3 - C_3 + J_2 + g(R_1 + R_2)] + x(1-y)(R_3 + E_3 - C_3 + J_2 - \beta L_2) + y(1-x)(R_3 + E_3 - C_3) + (1-x)(1-y)(R_3 + E_3 - C_3 - \beta L_2),\tag{9}$$

$$U_3^{1-z} = xy[g(R_1 + R_2) + R_3 - S_3] + x(1-y)R_3 + y(1-x)(R_3 - S_3) + (1-x)(1-y)R_3,\tag{10}$$

$$\overline{U}_3 = zU_3^z + (1-z)U_3^{1-z} = R_3 + z(E_3 - C_3 - \beta L_2 + xJ_2 + \beta yL_2) + y(z-1)S_3 + gxy(R_1 + R_2).\tag{11}$$

同理, 水环境治理 PPP 项目社会主体复制动态方程 $W(z)$ 为

$$W(z) = \frac{dz}{dt} = z(U_3^z - \overline{U}_3) = z(1-z)[E_3 - C_3 + xJ_2 + y(S_3 + \beta L_2) - \beta L_2].\tag{12}$$

2.2 演化博弈稳定性分析

复制动态系统由政府主体、经济主体和社会主体构成, 联立式(4), (8), (12), 可得复制动态方程组^[19]为

$$\left. \begin{aligned}W(x) &= x(1-x)[E_1 - B_1 + K_1 + S_1 - y(J_1 + K_1 + S_1) - zJ_2], \\ W(y) &= y(1-y)[E_2 - B_2 + x(J_1 + K_1) + z(S_2 + \gamma L_1) - \gamma L_1], \\ W(z) &= z(1-z)[E_3 - C_3 + xJ_2 + y(S_3 + \beta L_2) - \beta L_2].\end{aligned}\right\}\tag{13}$$

当 $W(x)=W(y)=W(z)=0$ 时, 式(13)存在 8 个特殊均衡点, 分别为 $D_1=(0,0,0), D_2=(1,0,0), D_3=(0,1,0), D_4=(0,0,1), D_5=(1,1,0), D_6=(1,0,1), D_7=(0,1,1), D_8=(1,1,1)$.

当 $E_1 - B_1 + K_1 + S_1 - y(J_1 + K_1 + S_1) - zJ_2 = 0, E_2 - B_2 + x(J_1 + K_1) + z(S_2 + \gamma L_1) - \gamma L_1 = 0$ 及 $E_3 - C_3 + xJ_2 + y(S_3 + \beta L_2) - \beta L_2 = 0$ 时, 存在均衡点 $D_9=(x^*, y^*, z^*)$. 根据李亚普诺夫稳定性理论, 把均衡点带入演化博弈系统雅可比矩阵求特征值, 当且仅当 3 个特征值均为负值时, 此均衡点为演化稳定策略(ESS), 可认为该系统是稳定的^[20].

对复制动态方程进行求导, 可得雅可比矩阵 J 为

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dW(x)}{d(x)} & \frac{dW(x)}{d(y)} & \frac{dW(x)}{d(z)} \\ \frac{dW(y)}{d(x)} & \frac{dW(y)}{d(y)} & \frac{dW(y)}{d(z)} \\ \frac{dW(z)}{d(x)} & \frac{dW(z)}{d(y)} & \frac{dW(z)}{d(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}.\tag{14}$$

式(14)中: $J_{11}=(1-2x)[E_1 - B_1 + K_1 + S_1 - y(J_1 + K_1 + S_1) - zJ_2]$; $J_{12}=x(x-1)(J_1 + K_1 + S_1)$; $J_{13}=x(x-1)J_2$; $J_{21}=y(1-y)(J_1 + K_1)$; $J_{22}=(1-2y)[E_2 - B_2 + x(J_1 + K_1) + z(S_2 + \gamma L_1) - \gamma L_1]$;

$$J_{23}=y(1-y)(S_2+\gamma L_1); J_{31}=z(1-z)J_2; J_{32}=z(1-z)(S_3+\beta L_2); J_{33}=(1-2z)[E_3-C_3+xJ_2+y(S_3+\beta L_2)-\beta L_2].$$

将均衡点带入雅可比矩阵 J , 可得演化博弈均衡点的特征值, 如表 2 所示. 由于 $D_9=(x^*, y^*, z^*)$ 对应的雅可比矩阵迹为 0, 其特征值之和为 0, 不存在 3 个特征值都为负, $D_9=(x^*, y^*, z^*)$ 非 ESS, 故不在表 2 中讨论.

表 2 演化博弈均衡点的特征值
Tab. 2 Eigenvalues of equilibrium points in evolutionary games

均衡点	特征值 1	特征值 2	特征值 3
$D_1=(0,0,0)$	$E_1-B_1+K_1+S_1$	$E_2-B_2-\gamma L_1$	$E_3-C_3-\beta L_2$
$D_2=(1,0,0)$	$-(E_1-B_1+K_1+S_1)$	$E_2-B_2-\gamma L_1+J_1+K_1$	$E_3-C_3-\beta L_2+J_2$
$D_3=(0,1,0)$	$E_1-B_1-J_1$	$-(E_2-B_2-\gamma L_1)$	$E_3-C_3+S_3$
$D_4=(0,0,1)$	$E_1-B_1-J_2+K_1+S_1$	$E_2-B_2+S_2$	$-(E_3-C_3-\beta L_2)$
$D_5=(1,1,0)$	$-(E_1-B_1-J_1)$	$-(E_2-B_2-\gamma L_1+J_1+K_1)$	$E_3-C_3+J_2+S_3$
$D_6=(1,0,1)$	$-(E_1-B_1-J_2+K_1+S_1)$	$E_2-B_2+J_1+K_1+S_2$	$-(E_3-C_3-\beta L_2+J_2)$
$D_7=(0,1,1)$	$E_1-B_1-J_1-J_2$	$-(E_2-B_2+S_2)$	$-(E_3-C_3+S_3)$
$D_8=(1,1,1)$	$-(E_1-B_1-J_1-J_2)$	$-(E_2-B_2+J_1+K_1+S_2)$	$-(E_3-C_3+J_2+S_3)$

模型中所有的损益变量均大于 0, 且 $E_1>B_1, E_2>B_2$, 由于 $D_1=(0,0,0), D_4=(0,0,1), D_6=(1,0,1)$ 存在特征值恒大于 0, 即 $E_1-B_1+K_1+S_1>0, E_2-B_2+S_2>0, E_2-B_2+J_1+K_1+S_2>0$, 不满足李雅普诺夫稳定性理论, 故只对 $D_2=(1,0,0), D_3=(0,1,0), D_5=(1,1,0), D_7=(0,1,1), D_8=(1,1,1)$ 这 5 个均衡点的稳定性进行分析, 存在以下 5 种情况.

情况 1: 当 $E_2-B_2-\gamma L_1+J_1+K_1<0, E_3-C_3-\beta L_2+J_2<0$ 时, 由李雅普诺夫稳定性理论可知, 均衡点 $D_2=(1,0,0)$ 为 ESS, 此时, 政府主体选择积极规制策略, 经济主体选择被动履责策略, 社会主体选择不参与策略.

情况 2: 当 $E_1-B_1-J_1<0, E_2-B_2-\gamma L_1>0, E_3-C_3+S_3<0$ 时, 由李雅普诺夫稳定性理论可知, 均衡点 $D_3=(0,1,0)$ 为 ESS, 此时, 政府主体选择消极规制策略, 经济主体选择自主推进策略, 社会主体选择不参与策略.

情况 3: 当 $E_1-B_1-J_1>0, E_2-B_2-\gamma L_1+J_1+K_1>0, E_3-C_3+J_2+S_3<0$ 时, 由李雅普诺夫稳定性理论可知, 均衡点 $D_5=(1,1,0)$ 为 ESS, 此时, 政府主体选择积极规则策略, 经济主体选择自主推进策略, 社会主体选择不参与策略.

情况 4: 当 $E_1-B_1-J_1-J_2<0, E_3-C_3+S_3>0$ 时, 由李雅普诺夫稳定性理论可知, 均衡点 $D_7=(0,1,1)$ 为 ESS, 此时, 政府主体选择消极规制策略, 经济主体选择自主推进策略, 社会主体选择主动参与策略.

情况 5: 当 $E_1-B_1-J_1-J_2>0, E_3-C_3+J_2+S_3>0$ 时, 由李雅普诺夫稳定性理论可知, 均衡点 $D_8=(1,1,1)$ 为 ESS, 此时, 政府主体选择积极规制策略, 经济主体选择自主推进策略, 社会主体选择主动参与策略.

通过上述分析可知, 演化稳定策略(图 1)受多个参数影响, 且不同约束条件下对应的 ESS 不同. 为了进一步验证博弈模型结果的合理性及有效性, 通过 MATLAB 软件对演化稳定策略和参数敏感性进行仿真模拟.

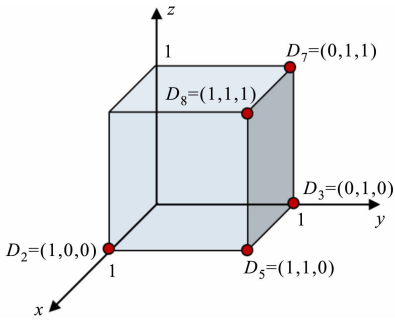


图 1 5 种演化稳定策略
Fig. 1 Five cases of ESS

3 多主体演化博弈仿真分析

3.1 博弈模型结果验证

1) 当复制动态系统 ESS 为 $D_2=(1,0,0)$ 时, 在 $E_2-B_2-\gamma L_1+J_1+K_1<0$ 且 $E_3-C_3-\beta L_2+J_2<0$ 的条件下, 对仿真数据进行赋值, 结果如表 3 所示.

表 3 ESS 为 $D_2=(1,0,0)$ 时的仿真数据赋值

Tab. 3 Assign values to simulation data when ESS is $D_2=(1,0,0)$

损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值
E_1	90	J_2	8	S_2	30	C_3	30
B_1	60	S_1	20	γ	0.2	S_3	5
K_1	20	E_2	100	L_1	350	β	0.3
J_1	10	B_2	70	E_3	15	L_2	15

将初始值带入 MATLAB 软件,得到情况 1 的演化轨迹,如图 2 所示。由图 2 可知:在 $E_2-B_2-\gamma L_1+J_1+K_1<0$ 且 $E_3-C_3-\beta L_2+J_2<0$ 的条件下,任意 (x,y,z) 的仿真结果都趋于 $D_2=(1,0,0)$,这说明随着系统演化,经济主体和社会主体逐渐趋于选择被动履责和不参与策略,此时,政府主体为了推动水环境治理 PPP 项目实施,提高治理效果,最终会选择积极规制策略。

2) 当复制动态系统 ESS 为 $D_3=(0,1,0)$ 时,在 $E_1-B_1-J_1<0,E_2-B_2-\gamma L_1>0$ 且 $E_3-C_3+S_3<0$ 的条件下,对仿真数据进行赋值,结果如表 4 所示。

表 4 ESS 为 $D_3=(0,1,0)$ 时的仿真数据赋值

Tab. 4 Assign values to simulation data when ESS is $D_3=(0,1,0)$

损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值
E_1	65	J_2	8	S_2	30	C_3	30
B_1	60	S_1	20	γ	0.2	S_3	5
K_1	20	E_2	100	L_1	100	β	0.3
J_1	10	B_2	70	E_3	15	L_2	15

将初始值带入 MATLAB 软件,得到情况 2 的演化轨迹,如图 3 所示。由图 3 可知:在 $E_1-B_1-J_1<0,E_2-B_2-\gamma L_1>0$ 且 $E_3-C_3+S_3<0$ 的条件下,任意 (x,y,z) 的仿真结果都趋于 $D_3=(0,1,0)$,这是因为政府主体对自主推进项目的经济主体提供税收优惠和经济补贴高于积极规制下可以获得的额外经济利润,因此,政府主体最终选择消极规制策略。对于社会主体而言,此时主动参与项目成本较大,因此,选择不参与策略。然而,经济主体此时获得的额外经济利润大于社会主体不参与项目时,经济主体选择自主推进策略给本方带来的损失,因此,经济主体选择自主推进策略。

3) 当复制动态系统的 ESS 为 $D_5=(1,1,0)$ 时,在 $E_1-B_1-J_1>0,E_2-B_2-\gamma L_1+J_1+K_1>0$ 且 $E_3-C_3+J_2+S_3<0$ 的条件下,对仿真数据进行赋值,结果如表 5 所示。

表 5 ESS 为 $D_5=(1,1,0)$ 时的仿真数据赋值

Tab. 5 Assign values to simulation data when ESS is $D_5=(1,1,0)$

损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值
E_1	90	J_2	8	S_2	30	C_3	30
B_1	60	S_1	20	γ	0.2	S_3	5
K_1	20	E_2	100	L_1	100	β	0.3
J_1	10	B_2	70	E_3	15	L_2	15

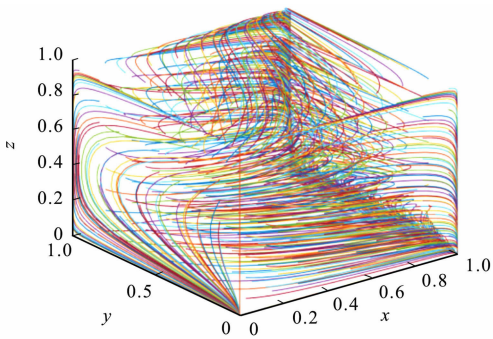


图 2 情况 1 的演化轨迹
Fig. 2 Evolutionary path of case 1

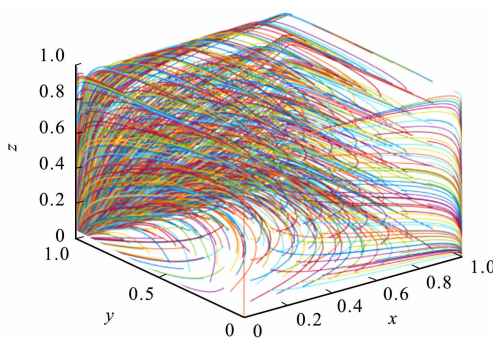


图 3 情况 2 的演化轨迹
Fig. 3 Evolutionary path of case 2

将初始值带入 MATLAB 软件, 可得情况 3 的演化轨迹, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 在 $E_1 - B_1 - J_1 > 0, E_2 - B_2 - \gamma L_1 + J_1 + K_1 > 0$ 且 $E_3 - C_3 + J_2 + S_3 < 0$ 的条件下, 任意 (x, y, z) 的仿真结果趋于 $D_5 = (1, 1, 0)$, 说明当社会主体主动参与水环境治理 PPP 项目成本过大时, 即使政府主体选择积极规制策略, 经济主体选择自主推进策略, 社会主体选择主动参与的概率也会逐渐降低, 最终趋于 0.

4) 当复制动态系统 ESS 为 $D_7 = (0, 1, 1)$ 时, 在 $E_1 - B_1 - J_1 - J_2 < 0$ 且 $E_3 - C_3 + S_3 > 0$ 的条件下, 对仿真数据进行赋值, 结果如表 6 所示.

表 6 ESS 为 $D_7 = (0, 1, 1)$ 时的仿真数据赋值

Tab. 6 Assign values to simulation data when ESS is $D_7 = (0, 1, 1)$

损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值
E_1	65	J_2	8	S_2	30	C_3	30
B_1	60	S_1	20	γ	0.2	S_3	5
K_1	20	E_2	100	L_1	100	β	0.3
J_1	10	B_2	70	E_3	35	L_2	35

将初始值带入 MATLAB 软件, 可得情况 4 的演化轨迹, 如图 5 所示. 在 $E_1 - B_1 - J_1 - J_2 < 0$ 且 $E_3 - C_3 + S_3 > 0$ 的条件下, 任意 (x, y, z) 仿真结果都趋于 $D_7 = (0, 1, 1)$, 这说明当政府主体积极规制下获得的额外经济利润低于给予经济主体和社会主体的补贴时, 政府主体选择积极规制的概率会逐渐趋于 0; 而当采取积极行为获得的额外收益过高时, 即使政府主体选择消极规制策略, 经济主体和社会主体最终依旧会选择自主推进策略和主动参与策略.

5) 当复制动态系统 ESS 为 $D_8 = (1, 1, 1)$ 时, 在 $E_1 - B_1 - J_1 - J_2 > 0$ 且 $E_3 - C_3 + J_2 + S_3 > 0$ 的条件下, 对仿真数据进行赋值, 结果如表 7 所示.

表 7 ESS 为 $D_8 = (1, 1, 1)$ 时的仿真数据赋值

Tab. 7 Assign values to simulation data when ESS is $D_8 = (1, 1, 1)$

损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值
E_1	90	J_2	8	S_2	30	C_3	30
B_1	60	S_1	20	γ	0.2	S_3	5
K_1	20	E_2	100	L_1	100	β	0.3
J_1	10	B_2	70	E_3	35	L_2	35

将初始值带入 MATLAB 软件, 可得情况 5 的演化轨迹, 如图 6 所示. 由图 6 可知: 在 $E_1 - B_1 - J_1 - J_2 > 0$ 且 $E_3 - C_3 + J_2 + S_3 > 0$ 的条件下, 任意 (x, y, z) 的仿真结果都趋于 $D_8 = (1, 1, 1)$, 即在确保水环境治理 PPP 项目利益相关者采取积极行为可获得足够利益的情况下, 政府主体选择积极规则策略, 经济主体选择自主推进策略, 社会主体选择主动参与策略的概率均趋近于 1.

3.2 政府主体激励强度对复制动态系统稳定性的影响

政府主体为了激发经济主体和社会主体的内在活力, 提高水环境治理效率, 通常对参与主体提供优惠政策, 如进行经济补贴或税收减免. 根据上文假设, 对仿真数据进行赋值(表 8), 并设 $x = y = z = 0.65$.

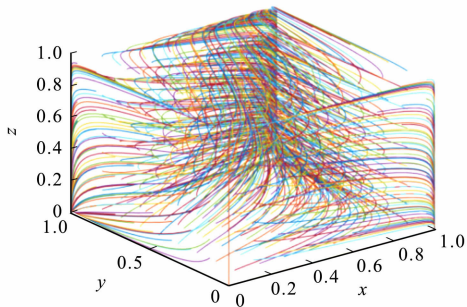


图 4 情况 3 的演化轨迹
Fig. 4 Evolutionary path of case 3

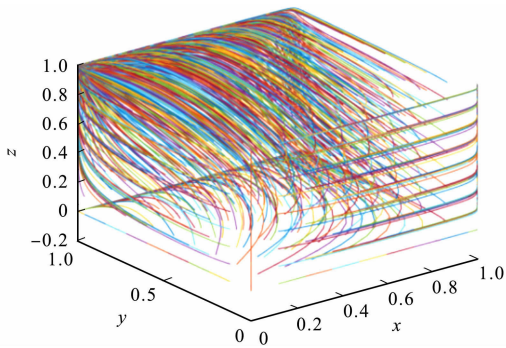


图 5 情况 4 的演化轨迹
Fig. 5 Evolutionary path of case 4

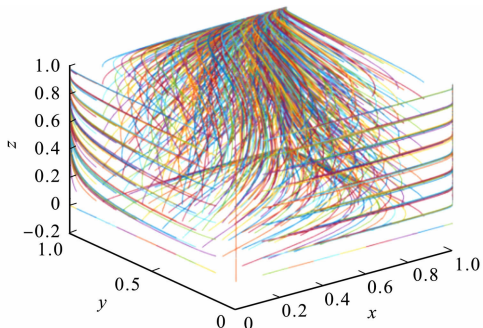


图 6 情况 5 的演化轨迹
Fig. 6 Evolutionary path of case 5

表 8 仿真数据赋值
Tab. 8 Assign values to simulation data

损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值	损益变量	初始值
E_1	90	J_2	8	S_2	30	C_3	30
B_1	60	S_1	20	γ	0.2	S_3	5
K_1	20	E_2	100	L_1	350	β	0.3
J_1	10	B_2	70	E_3	15	L_2	15

1) 不同 J_1 取值对策略选择的影响. 在其他参数不变的条件下, 令 $J_1=10, 15, 20, 35$, 可得 J_1 变化时复制动态系统的演化轨迹图, 如图 7 所示. 由图 7 可知: 随着 J_1 不断增大, 整个系统从 $D_2=(1, 0, 0)$ 向 $D_5=(1, 1, 0)$ 趋近, 说明政府主体对经济主体的激励强度提升在一定程度上可以促使其在水环境治理过程中产生积极行为. 然而, 在 $(20, 35)$ 之间存在一个临界值 J_1^* , 当 $J_1>J_1^*$ 时, 政府主体和经济主体的演化轨迹呈上下波动形式, 复制动态系统不会稳定在中心点, 政府主体和经济主体的策略选择处于不断变化中, 没有演化稳定策略. 因此, 不宜盲目增大激励强度.

2) 不同 J_2 取值对策略选择的影响. 在其他参数不变的条件下, 令 $J_2=8, 12, 16, 28$, 可得 J_2 变化时复制动态系统演化轨迹图, 如图 8 所示. 由图 8 可知: $(8, 12)$ 之间存在一个临界值 J_2^* , $(16, 28)$ 之间存在一个临界值 J_2^{**} , $J_2^*<J_2^{**}$; 当 $J_2<J_2^*$ 时, 系统向 $D_2=(1, 0, 0)$ 趋近; 当 $J_2^*<J_2<J_2^{**}$ 时, 系统向 $D_8=(1, 1, 1)$ 趋近, 随着 J_2 的增大, 系统收敛速度逐渐加快; 当 $J_2>J_2^{**}$ 时, 政府主体和社会主体的演化轨迹上下震动, 复制动态系统不会稳定在中心点, 政府主体和社会主体的策略选择处于不断变化中, 没有演化稳定策略. 由此可知, 增大 J_2 不仅可以激发社会主体参与水环境治理项目的热情, 还可以促进经济主体积极主动投身于水环境治理 PPP 项目, 实现项目合作共赢. 然而, 与 J_1 取值类似, 应当把 J_2 控制在合理取值范围之内, 以防因 J_2 过高导致复制动态系统不稳定.

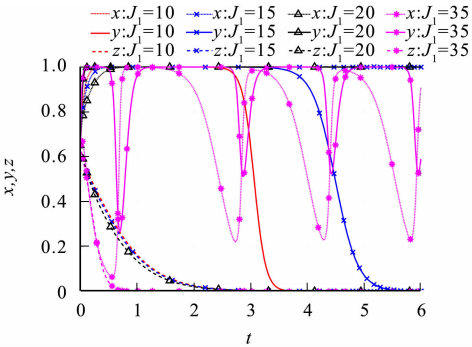


图 7 J_1 变化时复制动态系统演化轨迹

Fig. 7 Evolutionary path of replication dynamic system with J_1 changing

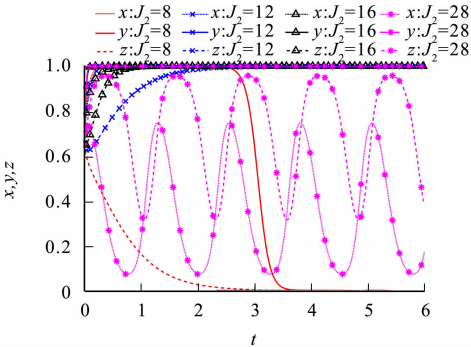


图 8 J_2 变化时复制动态系统演化轨迹

Fig. 8 Evolutionary path of replication dynamic system with J_2 changing

3.3 政府主体惩罚力度对复制动态系统稳定性的影响

在其他参数不变的条件下, 令 $K_1=20, 25, 30, 35$, 可得 K_1 变化时复制动态系统的演化轨迹图, 如图 9 所示. 由图 9 可知: $(25, 30)$ 之间存在一个临界值 K_1^* , 当 $K_1<K_1^*$ 时, 复制动态系统向 $D_2=(1, 0, 0)$ 趋近; 当 $K_1^*<K_1$ 时, 系统向 $D_5=(1, 1, 0)$ 趋近, 且随着 K_1 的增大, 经济主体策略概率趋近于 1 的收敛速度逐渐加快. 因此, 增大 K_1 可以避免经济主体选择消极行为, 但此时经济主体的行为转变难以带动社会主体参与水环境治理 PPP 项目的积极性.

3.4 损失系数对复制动态系统稳定性的影响

1) 损失系数 γ 对策略选择的影响. 在其他参数不变的条件下, 令 $\gamma=0.14, 0.16, 0.18, 0.20$, 可得不同损失系数 γ 下复制动态系统的演化轨迹图, 如图 10 所示. 由图 10 可知: $(0.16, 0.18)$ 之间存在一个临界值 γ^* , 当 $\gamma^*<\gamma$ 时, 系统向 $D_2=(1, 0, 0)$ 趋近; 当 $\gamma<\gamma^*$ 时, 系统向 $D_5=(1, 1, 0)$ 趋近, 且随着 γ 的减小, 经济主体策略概率趋近于 1 的收敛速度逐渐加快, 说明 γ 减小可推动经济主体选择积极策略.

2) 损失系数 β 对策略选择的影响. 在其他参数不变的条件下, 令 $\beta=0.24, 0.26, 0.28, 0.30$, 可得不同损失系数 β 下复制动态系统的演化轨迹图, 如图 11 所示. 由图 11 可知: 系统对损失系数 β 不敏感, 此

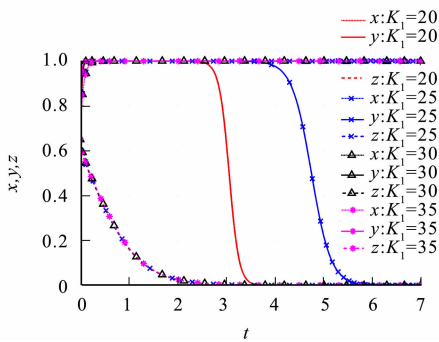


图 9 K_1 变化时复制动态系统演化轨迹

Fig. 9 Evolutionary path of replication dynamic system with K_1 changing

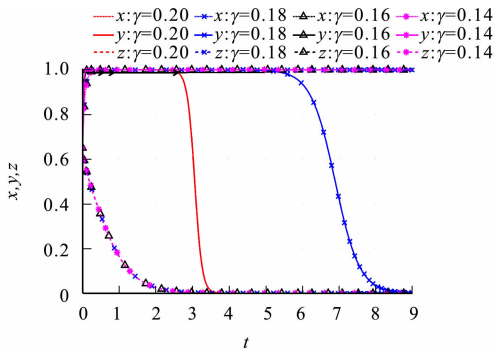


图 10 γ 变化时复制动态系统演化轨迹

Fig. 10 Evolutionary path of replication dynamic system with γ changing

时,系统演化稳定策略仍为 $D_2=(1,0,0)$,这说明当经济主体选择被动履责策略时,即使减小社会主体主动参与项目给本方带来的风险,也不会改变他们的意愿。

4 结论与建议

采用演化博弈分析法构建多主体行为演化博弈模型,分析政府主体、经济主体和社会主体在博弈过程中的演化均衡策略,并通过 MATLAB 软件进行数值仿真模拟,可得以下 3 个结论。

- 1) 从演化博弈角度看,水环境治理 PPP 项目政府主体、经济主体和社会主体构成的复制动态系统稳定性受多个参数影响,但在基本条件 $E_1>B_1, E_2>B_2$ 的情况下,可通过调节系统参数达到{积极规制,自主推进,主动参与}的理想稳定状态。
- 2) 从激励角度看,政府主体提高奖励力度可促使经济主体和社会主体采取正向积极行为。其中,增加对社会主体的激励强度可以同时加快自主推进、主动参与策略的收敛速度。然而,系统稳定性对激励强度较为敏感,政府主体需要控制奖励力度,当超过临界值时,激励效果反而会降低。
- 3) 从惩罚与损失角度看,政府主体实施惩罚规制在一定程度上可以约束经济主体策略选择,干预消极行为;损失系数 γ 的减小对经济主体策略选择具有正向推动作用,而损失系数 β 对演化博弈影响较弱。因此,弱化社会主体消极行为对经济主体的负面影响,促使政府主体选择积极规制策略是提高项目治理绩效的关键点。

为了优化政府规制,提高水环境治理 PPP 项目的治理成效,提出以下 3 个建议。

- 1) 激发企业内在创新力。融合生态环境导向的开发(EOD)模式理念,政府可以鼓励相关治污主体在完成水环境治理的同时,结合当地特色开发特色产业链,如生态农业、生态旅游、康养院等,从而提高项目经济效益,确保基本条件 $E_1>B_1, E_2>B_2$ 在治理项目实施过程中处于恒成立状态。
- 2) 完善政府奖惩规制。政府规制部门应制定详细的水环境治理 PPP 项目特征指标、运营维护和绩效考核指标等,以此作为奖惩标准,对于履责或主动参与的,可给予经济奖励、经营性项目使用优惠、其他项目政策补偿等激励保障;对于违背合同协议或采取投机行为的,可进行高力度经济惩罚,严重者在一定时间范围内禁止其参与此类项目,从而约束消极行为。同时,要在项目建设前期测算 J_1, J_2 的临界值,采取动态监管手段,将激励强度控制在一定阈值内,防止出现复制动态系统失衡现象。
- 3) 优化多主体协同治理机制。为了促进经济主体策略概率趋近于 1,在制定规制策略时可以把弱化社会主体消极行为对经济主体的负面影响作为提高项目绩效的切入点,通过环保宣传提高社会主体的环保意识;建立多渠道参与机制,通过交互性新媒体网络传播形成网络传递效应,对经济主体消极行为形成吓阻。

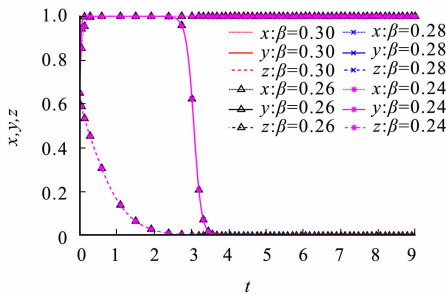


图 11 β 变化时复制动态系统演化轨迹

Fig. 11 Evolutionary path of replication dynamic system with β changing

参考文献：

[1] 宋民雪,刘德海,尹伟巍. 经济新常态、污染防治与政府规制：环境突发事件演化博弈模型[J]. 系统工程理论与实践,2021,41(6):1454-1464. DOI:10.12011/SETP2019-2338.

[2] AN Xiaowei,LI Huimin,WANG Lunyan,*et al.* Compensation mechanism for urban water environment treatment PPP project in China[J]. Journal of Cleaner Production,2018,201:246-253. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.08.003.

[3] 张亚琼,何楠,杨丝雯,等. 基于演化博弈的水生态 PPP 项目第三方监管策略[J]. 水资源保护,2021,37(4):166-172. DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.024.

[4] LI Huimin,XIA Qing,WEN Shiping,*et al.* Identifying factors affecting the sustainability of water environment treatment public-private partnership projects[J]. Advances in Civil Engineering,2019,2019(11):1-15. DOI:10.1155/2019/7907234.

[5] 吕天宇,赵微,李娜,等. 基于农民满意度的农村水环境治理绩效研究：以湖北省部分县市的调查为例[J]. 水土保持通报,2020,40(6):137-145,152. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.020.

[6] 王丽琼,张云峰. 乡村振兴视阈下泉州市农村环境多元共治有效路径研究[J]. 中国农业资源与区划,2019,40(8):219-225. DOI:10.7621/cjarrp.1005-9121.20190827.

[7] 王雪莹,张新月,雷阳,等. 于桥水库浮游动物群落结构与水环境因子关系多元分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2021,37(4):32-40. DOI:10.12046/j.issn.1000-5277.2021.04.005.

[8] OKUMAH M,YEBOAH A S. Exploring stakeholders' perceptions of the quality and governance of water resources in the Wenchi municipality[J]. Journal of Environmental Planning and Management,2020,63(8):1375-1403. DOI:10.1080/09640568.2019.1663724.

[9] 黄德春,宋佳,贺正齐,等. 澜沧江-湄公河环境利益合作网络主体治理效益评价[J]. 亚太经济,2019(4):21-29,149-150. DOI:10.16407/j.cnki.1000-6052.20190819.010.

[10] COTLER H,CUEVAS M L,LANDA R,*et al.* Environmental governance in urban watersheds: The role of civil society organizations in Mexico[J]. Sustainability,2022,14(2):1-26. DOI:10.3390/SU14020988.

[11] ZHAO Xin,BAI Yu,DING Lili. Incentives for personal carbon account: An evolutionary game analysis on public-private-partnership reconstruction[J]. Journal of Cleaner Production,2021,282(9):125358. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.125358.

[12] 潘鹤思,李英,柳洪志. 央地两级政府生态治理行动的演化博弈分析：基于财政分权视角[J]. 生态学报,2019,39(5):1772-1783. DOI:10.5846/stxb201803230578.

[13] LIU Jicai,GAO Ruolan,CHEAH C Y J,*et al.* Evolutionary game of investors' opportunistic behaviour during the operational period in PPP projects[J]. Construction Management and Economics,2017,35(1/2/3):137-153. DOI:10.1080/01446193.2016.1237033.

[14] 申津羽,王煜琪,赵正. 公众参与城市水环境治理行为的影响因素：基于北上广三地的调查数据[J]. 资源科学,2021,43(11):2289-2302. DOI:10.18402/resci.2021.11.12.

[15] 任志涛,郭亚,孙彦武. 环境治理公私合作项目多方主体价值共创演化博弈研究[J]. 软科学,2022,36(4):132-137. DOI:10.13956/j.ss.1001-8409.2022.04.18.

[16] 高旭阔,席子云. 组合措施下政府与企业排污行为演化博弈[J]. 中国环境科学,2020,40(12):5484-5492. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0607.

[17] 张飞涟,梁秀峰,张志良,等. PPP 绩效付费项目参与主体机会主义行为演化研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(4):1053-1060. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20191012.

[18] CHEN Hongmei,WANG Jianxue,MIAO Yujun. Evolutionary game analysis on the selection of green and low carbon innovation between manufacturing enterprises[J]. Alexandria Engineering Journal,2021,60(2):2139-2147. DOI:10.1016/J.AEJ.2020.12.015.

[19] 崔萌. 协同治理背景下环保信用监管的三方演化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践,2021,41(3):713-726. DOI:10.12011/SETP2020-0480.

[20] XU Lang,DI Zhongjie,CHEN Jihong,*et al.* Evolutionary game analysis on behavior strategies of multiple stakeholders in maritime shore power system[J]. Ocean and Coastal Management,2021,202:105508. DOI:10.1016/J.OCECOAMAN.2020.105508.

(责任编辑：钱筠 英文审校：刘源岗)