

DOI: 10.20103/j.stxb.202410152512

刘亦文,高京淋,曾琪海,颜建军,颜子腾.协同策略差异化下长江流域水污染治理激励机制研究.生态学报,2025,45(12): - .

Liu Y W, Gao J L, Zeng Q H, Yan J J, Yan Z T. Research on incentive mechanisms for water pollution control in the Yangtze River basin under differentiated collaborative strategies. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): - .

协同策略差异化下长江流域水污染治理激励机制研究

刘亦文¹, 高京淋¹, 曾琪海², 颜建军², 颜子腾^{3,*}

1 湖南工商大学资源环境学院, 长沙 410205

2 湖南工商大学经济与贸易学院, 长沙 410205

3 香港城市大学工学院, 香港 999077

摘要: 目前针对长江流域水污染治理的研究多围绕单一政策展开, 往往忽略了策略协同效应。鉴于此, 在考虑河长制和生态补偿政策协同的基础上, 研究长江流域水污染协同治理激励机制。建立上级政府、长江上游地方政府与长江下游地方政府间的三方演化博弈模型, 探讨在协同策略差异化背景下, 三方协同推进流域治理的内生机制, 通过稳定性分析得出达到流域水污染治理理想状态的稳定条件, 并以沱湖-长江流域真实数据进行模拟仿真, 由此设计潜在激励机制。研究发现: (1) 上级政府对下级政府的惩罚力度并不能抵扣自身监管成本, 最终倾向于实施弱监管策略; 影响上游地方政府治理策略选择的因素主要包含生态补偿额和奖励机制, 影响下游地方政府治理策略选择的因素主要包含流域外部性和奖励机制; 长江上下游地方政府面临高生态补偿额和高奖励情景时, 博弈系统最终演化为“弱监管/自主治理/自主治理”状态。(2) 加快完善流域生态补偿制度, 规范流域生态补偿标准, 加大对长江上游地方政府的补偿额度, 能够推动长江上游地方政府积极开展流域水污染治理工作, 而加大对长江下游地方政府的补偿额度并未对下游地方政府水污染治理工作展现出明显的促进效果。(3) 上级政府对长江下游地方政府的奖励措施能够加快流域水污染治理工作进程, 奖励力度越大, 水污染治理进展越快, 但对长江上游地方政府的奖励措施并不能推进上游地方政府治理工作的进行; 上级政府对下级政府的惩罚措施在实际工作中的作用较小, 严厉的惩罚措施甚至会抑制下级地方政府治理积极性。

关键词: 河长制; 生态补偿; 长江流域协同治理; 激励机制设计

Research on incentive mechanisms for water pollution control in the Yangtze River basin under differentiated collaborative strategies

LIU Yiwen¹, GAO Jinglin¹, ZENG Qihai², YAN Jianjun², YAN Ziteng^{3,*}

1 School of Resource and Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

2 School of Economics and Trade, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

3 College of Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

Abstract: Current research on Yangtze River basin water pollution control predominantly examines isolated policies while overlooking policy synergy. In light of this, this paper studies the collaborative governance incentive mechanism for water pollution in the Yangtze River basin, by analyzing the policy interaction between the River Chief System and ecological compensation mechanisms, with the aim of contributing to the advancement of water pollution governance efforts in the region. A tripartite evolutionary game framework was constructed involving the central government, upper-reach municipalities, and lower-reach jurisdictions, this study explores the endogenous mechanisms for promoting basin governance under the background of differentiated collaborative strategies and analyzes stability, determining the stability

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(24BTJ032); 湖南省研究生科研创新项目(CX20240947)

收稿日期: 2024-10-15; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zitengyan2-c@my.cityu.edu.hk

conditions of the game-theoretic agents in the optimal scenarios of water pollution control in the basin. On this basis, using real data from the Tuohu Yangtze River basin for simulation, analyze the decision-making differences of upper reaches and lower reaches under different ecological compensation amounts, reward and punishment levels, and design potential incentive mechanisms. The findings are as follows: (1) The penalties imposed by central governments on lower-level governments fail to compensate for the regulators' own enforcement expenditures, thereby inducing the adoption of lenient regulatory enforcement. Factors influencing the governance strategy choices of the upper reaches mainly include ecological compensation amounts and reward mechanisms, while those for the lower reaches primarily include externalities and reward mechanisms. When upper-reach municipalities and lower-reach jurisdictions confront high ecological compensation and high-reward scenarios, they engage in multi-stage games and eventually evolve to adopt proactive strategies to control regional water pollution. With the joint efforts of local governments, water pollution in the Yangtze River basin will be significantly improved. (2) Setting different ecological compensation amounts and observing the evolution path and results of local governments, the results show that enhancing the basin-wide ecological compensation framework, standardizing compensation standards and elevating compensation rates for upper-reach municipalities of the Yangtze can effectively promote water pollution control efforts in the basin. However, raising compensation amounts for local governments in the lower reaches does not affect their strategy choices. (3) Setting different reward and punishment mechanisms for lower-level governments and observing the evolution path and outcome changes of lower-level governments, the results show that the reward measures from the central government to local governments can accelerate the progress of water pollution governance in the basin. The magnitude of fiscal and political incentives is positively correlated with the optimization of governance speed. While, equivalent rewards prove ineffective in incentivizing upper-reach municipalities of the Yangtze. Furthermore, the punitive measures imposed by central governments on upper reaches and lower reaches governments have a relatively small effect in practical work, and strict punitive measures hinder the governance enthusiasm of lower-level governments, especially in terms of strategic choices for lower reaches. Generally, promoting water pollution control in different areas of the basin requires different policy incentives.

Key Words: River Chief System; ecological compensation; collaborative governance of the Yangtze River basin; design of incentive mechanisms

长江是中华民族的母亲河,也是中华民族发展的重要支撑。然而,随着人类社会经济的高速发展,长江流域生态环境压力日益增加。长江沿岸自然岸线破坏和侵占严重^[1],湿地碎片化,水环境的自然净化能力、生态系统的服务功能出现退化趋势^[2];沿岸化工区和其他工业园区缺乏统一规划,低质化、粗放化、同质化竞争激烈^[3],造成了严重的水体污染、空气污染等环境问题;上下游之间的绿色发展缺乏统筹,区域间环境保护措施的有机协调^[4],使得区域间的环境保护措施难以形成合力,影响了整体生态治理的效果。党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视长江流域发展,多次到长江流域省份考察,并先后在重庆、武汉、南京和南昌等地主持召开推动长江经济带发展座谈会,为新时代长江经济带的发展谋篇布局、把脉定向,形成治江方略。在 2023 年召开的进一步推动长江经济带高质量发展座谈会上,习近平总书记提出,“完善横向生态保护补偿机制,激发全流域参与生态保护的积极性。”2024 年,习近平总书记在新时代推动中部地区崛起座谈会上再次强调加强大江大河和重要湖泊生态环境系统治理、综合治理、协同治理。

流域协同治理是一种能较好整合监管与行政权力,且能改善行政分割导致的跨域污染问题的水环境治理模式^[5]。其中,横向生态补偿政策发挥着举足轻重的作用。横向生态补偿政策旨在通过经济激励手段,促进生态保护区域外部性的内部化^[6],不仅有助于激发流域上下游地区在生态保护与治理上的协同行动,形成流域治理的协同效应,还强化了对于生态环境保护工作的监督与管理^[7],为长江经济带的可持续发展提供了坚实的制度保障。现有关于横向生态补偿的研究主要围绕生态补偿标准制定^[8-9]、补偿机制设计^[10]、生态补偿

效率测度^[11-12]、横向生态补偿的实施带来的环境效益^[13-14]、经济效益^[15-16]和社会效应^[17-18]等方面展开。结果显示,我国横向生态补偿政策发展已取得相当进展。也有学者指出当前生态补偿政策在一定程度上忽略了在中国独特行政架构下,纵向政府间关系所承载的关键作用与权威性,从而显得纵向支持不足^[19]。其次,流域生态补偿中生态治理责任与经济利益分配的不均衡,使得各利益主体缺乏自主参与治理的驱动力,难以形成统一且被广泛接受的补偿标准^[20],极大限制了有效性和创新性,致使其实现路径仍主要依靠纵向的财政支付,横向生态补偿很难有大的进展^[21],并导致我国生态治理具有明显的制度粘性^[22]。

因此,强化纵向政府的引导、协调补偿主体间的关系是流域生态补偿政策持续发挥作用、实现长远效益的核心要义。作为对传统“九龙治水”分散管理模式的重突破,河长制通过明确责任归属等治理策略以及刚性的考核机制,有效推动了水污染治理工作的进展,全面激发了各级政府部门在生态环境治理中的积极性与创造力^[23-24],协商和平衡了不同补偿主体的利益诉求,为补偿主体间搭建了稳固的合作桥梁,保证了补偿措施的公平性和可持续性,促进了补偿主体间形成稳定合作^[25]。

基于此,本文将河长制嵌入流域生态补偿研究中,以跨界治理中的政策协同为理论视角,研究协同策略差异化背景下,长江流域水污染治理激励机制。建立上级政府、长江上游地方政府和长江下游地方政府之间的三方演化博弈模型,着重关注河长制与生态补偿政策间的协同作用,求解模型均衡点,基于真实数据进行不同策略情景下的仿真分析,探究三方协同推进流域治理的内生机制及潜在激励机制。本文的创新点在于,第一,通过梳理相关文献不难发现,大多文献集中分析单一政策的实施效果,忽略了流域生态治理政策协同这一特征事实,本文从政策协同视角出发,研究多政策交织实施效果,不仅丰富了流域治理的理论体系,也为理解复杂环境系统中的政策互动提供了新的分析工具。第二,基于对博弈系统演化规律的深入分析,本文提出了进一步完善流域协同治理模式的激励机制。这些激励机制不仅针对当前政策协同中存在的问题提出了具体的解决方案,还充分考虑了政策的长远效果和社会可接受性,为政府决策提供了可操作性的建议。

1 模型构建

1.1 模型假设及参数设置

假设1 地方政府肩负着生态环境保护的关键职责,其执行力度与治理模式的选择对生态系统的整体治理成效具有直接影响^[26-27]。同时,鉴于当前的制度框架,行政权力的合理配置与监管被视为应对生态挑战的核心策略^[19]。因此,本文假设推动实现流域协同治理模式需要上级政府和下级政府(包括长江上游地方政府和下游地方政府)的共同努力。上级政府主要监管下级政府在流域水污染治理中的行为。在上级政府强监管下,上级政策能够有效地观察到下级政府的行为,并对其实施奖励或者惩罚;而在弱监管下,上级政府不能有效地识别下级政府的行为,只能对其进行奖励措施。下级政府在此背景下选择并执行相应的策略,其行为后果产生的社会效益即为上级政府的收益。与此同时,上级政府能够向下级政府支付纵向生态补偿,下级政府间进行横向生态补偿。

假设2 博弈主体间存在信息不对称情况,且各级政府作为“经济理性人”,对生态治理策略的选择会综合考虑相应的成本—收益比例。

假设3 上级政府的策略空间为 $A=(a1,a2)=(\text{强监管},\text{弱监管})$ 。其中“强监管”是指上级政府采取严格的法律法规、政策措施和管理手段,监督下级政府在生态流域治理工作中的成效,且基于河道治理效果决定地方官员升迁及对下级政府的奖惩;“弱监管”是指上级政府对下级政府流域治理工作的管理不严格,但仍基于河道治理效果决定地方官员升迁及对下级政府的奖励^[28]。考虑信息不对称情况,其选择两类策略的概率分别为 $p_a, 1-p_a, p_a \in [0,1]$ 。

长江上游地方政府的策略空间为 $B=(b1,b2)=(\text{自主治理},\text{转嫁治理})$ 。其中“自主治理”表示地方政府主动履行自身治理职责,积极地治理上游流域;“转嫁治理”表示地方政府对上游流域不履行治理职责,将治理成本全部转嫁给下游流域。考虑信息不对称情况,其选择两类策略的概率分别为 $p_b, 1-p_b, p_b \in [0,1]$ 。

长江下游地方政府的策略空间为 $C=(c1,c2)=(\text{自主治理},\text{放弃治理})$ 。其中“自主治理”表示地方政府主动履行自身治理职责,积极地治理下游流域;“放弃治理”表示地方政府对下游流域不履行治理职责,放弃治理。考虑信息不对称情况,其选择两类策略的概率分别为 $p_c, 1-p_c, p_c \in [0,1]$ 。

根据上述假设,构建长江流域协同治理三方主体间博弈关系模型,如图 1 所示。

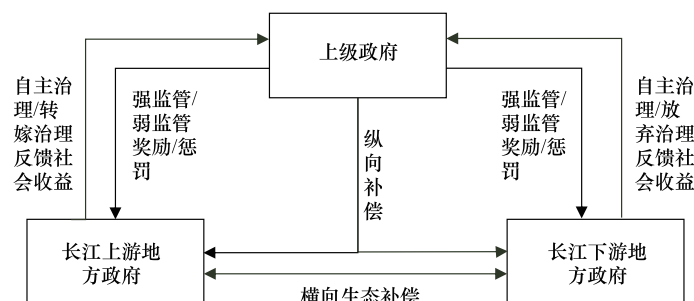


图 1 博弈关系模型

Fig.1 Game relationship model

结合流域生态治理的实际情况,将模型所需参数设置如下。

(1) 策略成本。上级政府采取“强监管”策略时的行政成本为 S_1 ,对长江上下游政府自主治理行为的奖励分别为 m_1, m_2 ;地方政府都不执行“自主治理”时,上级政府不得不介入地方流域治理的成本为 S_2 。长江上游地方政府选择“自主治理”策略时总成本为 C_1 ,此时,长江下游政府执行“自主治理”的总成本为 C_2 ;当上游地方政府选择转嫁治理时,下游地方政府自主治理成本需要额外的 C_3 。上级政府采取“强监管”时,上下游政府被发现采取消极治理将面临 D_1, D_2 的罚款。当上级政府采取“弱监管”,同时地方政府选择“自主治理”时,地方政府官员总会面临就任河长(责任承担)的机会成本 P_1, P_2 ,因为拥有实际权力的官员总是可以将河长的责任转嫁给没有实际权力的官员,进而避免自身升迁受限。假设成本总是大于等于零。

(2) 策略收益。长江上游地方政府执行“自主治理”策略时总收益为 R_1 ,执行“转嫁治理”时总收益为 R_2 。长江上下游地方政府均执行“自主治理”策略时,下游地方政府总收益为 G_1 ,有一方选择消极治理策略时总收益为 G_2 ,双方均消极治理时,下游地区必须承更大的负外部性,只能获得 G_3 的收益, G_3 一定小于 G_2 。考虑双向生态补偿制度,依据“改善者受益、恶化者赔偿”原则,假定长江上游地方政府可能收到的生态补偿额为 θ_1 ,长江下游地方政府可能收到的生态补偿额为 θ_2 。上级政府享受地方政府带来的社会收益总和 $H_i (i=1,2,3,4)$ 。其中, i 为上下游地方政府策略组合。假设收益总是大于等于零。

具体模型参数含义如表 1 所示。

表 1 模型参数含义

Table 1 Meaning of model parameters

博弈主体 Game player	参数符号 Parameter symbols	参数含义 Parameter meaning
上级政府 Central government	$A=(a1,a2)$	上级政府策略空间
	p_a	上级政府选择“强监管”策略的概率
	S_1	上级政府选择“强监管”策略的成本
	S_2	上级政府介入地方流域治理成本
	H_i	上级政府获得的社会收益
	m_1	上级政府对上游政府积极治理的奖励
	m_2	上级政府对下游政府积极治理的奖励
	D_1	上级政府对上游政府消极治理的惩罚
	D_2	上级政府对下游政府消极治理的惩罚
长江上游地方政府	$B=(b1,b2)$	长江上游地方政府策略空间

续表

博弈主体 Game player	参数符号 Parameter symbols	参数含义 Parameter meaning
Upper reaches of the Yangtze River	p_b	长江上游地方政府选择“自主治理”策略的概率
长江下游地方政府 Lower reaches of the Yangtze River	C_1	长江上游地方政府选择“自主治理”时的总成本
	θ_1	长江上游地方政府选择“自主治理”时收到的生态补偿额
	R_1	长江上游地方政府选择“自主治理”时的收益
	R_2	长江上游地方政府选择“转嫁治理”时的收益
	P_1	上级地方政府官员承担(河长)治理责任的机会成本
	$C=(c_1, c_2)$	长江下游地方政府策略空间
	p_c	长江下游地方政府选择“自主治理”策略的概率
	C_2	长江下游地方政府选择“自主治理”时的总成本
	C_3	长江下游地方政府选择“自主治理”时的额外成本
	θ_2	长江下游地方政府收到的生态补偿额
	G_1	长江下游地方政府选择“自主治理”时的收益
	G_2	长江上下游地方政府中有一方选择消极治理策略时的收益
	G_3	长江上下游地方政府均选择消极治理策略时的收益
	P_2	下级地方政府官员承担(河长)治理责任的机会成本

1.2 收益矩阵构建

基于上述假设、参数设定与博弈关系,可得收益矩阵如表 2 所示。

表 2 收益矩阵

Table 2 Payment matrix

策略组合 Strategy combination	中央政府收益 Central government revenue	上游地方政府收益 Revenue of upper-reach municipalities	下游地方政府收益 Revenue of lower-reach jurisdictions
(a_1, b_1, c_1)	$H_1 - S_1 - m_1 - m_2$	$R_1 + \theta_1 + m_1 - C_1$	$G_1 + m_2 - \theta_1 - C_2$
(a_1, b_1, c_2)	$H_2 - S_1 - m_1 + D_2$	$R_1 + \theta_1 + m_1 - C_1$	$G_2 - \theta_1 - D_2$
(a_1, b_2, c_1)	$H_3 - S_1 - m_2 + D_1$	$R_2 - \theta_2 - D_1$	$G_2 + \theta_2 + m_2 - C_2 - C_3$
(a_1, b_2, c_2)	$H_4 - S_1 - S_2 + D_1 + D_2$	$R_2 - \theta_2 - D_1$	$G_3 + \theta_2 - D_2$
(a_2, b_1, c_1)	$H_1 - m_1 - m_2$	$R_1 + \theta_1 + m_1 - C_1 - P_1$	$G_1 - \theta_1 + m_2 - C_2 - P_2$
(a_2, b_1, c_2)	$H_2 - m_1$	$R_1 + \theta_1 + m_1 - C_1 - P_1$	$G_2 - \theta_1$
(a_2, b_2, c_1)	$H_3 - m_2$	$R_2 - \theta_2$	$G_2 + \theta_2 + m_2 - C_2 - C_3 - P_2$
(a_2, b_2, c_2)	$H_4 - S_2$	$R_2 - \theta_2$	$G_3 + \theta_2$

2 演化博弈分析

2.1 模型求解

基于模型假设与参数设定,得到上级政府采取“强监管”、“弱监管”策略的期望收益 E_{a1} 、 E_{a2} 及平均期望收益 E_a 如下:

$$E_{a1} = p_b p_c (H_1 - S_1 - m_1 - m_2) + p_b (1 - p_c) (H_2 - S_1 - m_1 + D_2) + (1 - p_b) p_c (H_3 - S_1 - m_2 + D_1) + (1 - p_b) (1 - p_c) (H_4 - S_1 - S_2 + D_1 + D_2)$$

$$E_{a2} = p_b p_c (H_1 - m_1 - m_2) + p_b (1 - p_c) (H_2 - m_1) + (1 - p_b) p_c (H_3 - m_2) + (1 - p_b) (1 - p_c) (H_4 - S_2)$$

$$E_a = p_a E_{a1} + (1 - p_a) E_{a2}$$

同理,可得长江上游地方政府采取“自主治理”、“转嫁治理”策略的期望收益 E_{b1} 、 E_{b2} 及平均期望收益 E_b 分别为:

$$E_{b1} = p_a P_1 + R_1 + \theta_1 + m_1 - C_1 - P_1$$

$$E_{b2} = -p_a D_1 + R_2 - \theta_2$$

$$E_b = p_b E_{b1} + (1 - p_b) E_{b2}$$

长江下游地方政府采取“自主治理”、“放弃治理”策略的期望收益 E_{c1} 、 E_{c2} 及平均期望收益 E_c 分别为:

$$E_{c1} = p_a P_2 + p_b (G_1 - G_2 - \theta_1 - \theta_2 + C_3) + G_2 + \theta_2 + m_2 - C_2 - C_3 - P_2$$

$$E_{c2} = -p_a D_2 + p_b (G_2 - G_3 - \theta_1 - \theta_2) + G_3 + \theta_2$$

$$E_c = p_c E_{c1} + (1 - p_c) E_{c2}$$

进一步得到系统复制动态方程组:

$$\begin{cases} F(p_a) = \frac{d(p_a)}{dt} = p_a(1-p_a)(E_{a1}-E_{a2}) = (p_a-p_a^2)(-p_b D_1 - p_c D_2 + D_1 + D_2 - S_1) \\ F(p_b) = \frac{d(p_b)}{dt} = p_b(1-p_b)(E_{b1}-E_{b2}) = (p_b-p_b^2)[p_a(D_1+P_1) + R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1] \\ F(p_c) = \frac{d(p_c)}{dt} = p_c(1-p_c)(E_{c1}-E_{c2}) = (p_c-p_c^2)[p_a(D_2+P_2) + p_b(G_1-2G_2+G_3+C_3) + G_2 - G_3 - C_2 - C_3 - P_2 + m_2] \end{cases}$$

2.2 演化稳定策略分析

对微分方程系统演化稳定策略总是可由雅可比矩阵局部稳定性分析得到^[29-30]。因此按该方法论观点可得复制动态方程系统的雅可比矩阵:

$$J_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} (1-2p_a)(E_{a1}-E_{a2}) & (p_a^2-p_a)D_1 & (p_a^2-p_a)D_2 \\ (p_b-p_b^2)(P_1+D_1) & (1-2p_b)(E_{b1}-E_{b2}) & 0 \\ (p_c-p_c^2)(P_2+D_2) & (p_c-p_c^2)(G_1-2G_2+G_3+C_2) & (1-2p_c)(E_{c1}-E_{c2}) \end{bmatrix}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} E_{a1}-E_{a2} = -p_b D_1 - p_c D_2 + D_1 + D_2 - S_1 \\ E_{b1}-E_{b2} = p_a(D_1+P_1) + R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1 \\ E_{c1}-E_{c2} = p_a(D_2+P_2) + p_b(G_1-2G_2+G_3+C_3) + G_2 - G_3 - C_2 - C_3 - P_2 + m_2 \end{cases}$$

将均衡点代入雅可比矩阵中计算对应的特征值如表 3 所示。

表 3 局部均衡点对应的特征值

Table 3 Eigenvalues corresponding to the local equilibrium point

均衡点 Equilibrium	特征值 λ_1 Eigenvalue λ_1	特征值 λ_2 Eigenvalue λ_2	特征值 λ_3 Eigenvalue λ_3
(0,0,0)	$D_1 + D_2 - S_1$	$R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1$	$G_2 - G_3 - C_2 - C_3 - P_2 + m_2$
(0,0,1)	$D_1 - S_1$	$R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1$	$-(G_2 - G_3 - C_2 - C_3 - P_2 + m_2)$
(0,1,0)	$D_2 - S_1$	$-(R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1)$	$G_1 - G_2 - C_2 - P_2 + m_2$
(0,1,1)	$-S_1$	$-(R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1)$	$-(G_1 - G_2 - C_2 - P_2 + m_2)$
(1,0,0)	$S_1 - D_1 - D_2$	$R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 + D_1$	$G_2 - G_3 - C_2 - C_3 + D_2 + m_2$
(1,0,1)	$S_1 - D_1$	$R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 + D_1$	$-(G_2 - G_3 - C_2 - C_3 + D_2 + m_2)$
(1,1,0)	$S_1 - D_2$	$-(R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 + D_1)$	$G_1 - G_2 - C_2 + D_2 + m_2$
(1,1,1)	S_1	$-(R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 + D_1)$	$-(G_1 - G_2 - C_2 + D_2 + m_2)$

本研究参考 Lyapunov 所提出的方法,采用雅可比矩阵法对局部均衡点进行分析,当且仅当雅可比矩阵的所有特征值均为负时,局部均衡点满足渐进稳定条件^[31]。据上述均衡点稳定性特征,可知上级政府对下级政府的惩罚力度并不能抵扣自身监管成本,因此总有 $S_1 - D_1 - D_2 > 0$,即上级政府的均衡策略为“弱监管”,结合水环境治理政策的一般现实情况^[32],根据策略协同差异,将长江流域协同治理分为四类经济情形,分别是:①长江上下游地方政府面临低生态补偿额和低奖励情景;②长江上游地方政府面临低生态补偿额和低奖励,下游地方政府面临较大负外部性、高生态补偿额和高奖励情景;③长江上游地方政府面临高生态补偿额和高奖励,

下游地方政府面临较大正外部性、低生态补偿额和低奖励情景;④长江上下游地方政府均面临高生态补偿额和高奖励情景。对不同经济意义情景下的均衡点稳定性作进一步理论分析。

(1) 长江上下游地方政府面临低生态补偿额和低奖励情景

结论 1 当 $R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1 < 0$, $G_2 - G_3 - C_2 - C_3 - P_2 + m_2 < 0$ 时, 博弈系统最终会演化至稳定均衡点 $(0, 0, 0)$, 即“弱监管\转嫁治理\放弃治理”。

$R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1 < 0$ 表明长江上游地方政府收到的生态补偿额和奖励较低, 依靠自身财政支出难以支撑流域水污染治理成本, 因此上游政府没有自主治理的动力。 $G_2 - G_3 - C_2 - C_3 - P_2 + m_2 < 0$ 表明上游地方政府未进行相应的水污染治理时, 下游地方政府面临是负外部性可能较小, 选择“自主治理”策略带来的收益激励不足以抵消此时花费的成本; 同时, 上级政府对下游地区的奖励不足进一步阻碍了下游地方政府选择积极治理策略。

(2) 长江上游地方政府面临低生态补偿额和低奖励, 下游地方政府面临较大负外部性、高生态补偿额和高奖励情景

结论 2 当 $R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1 < 0$, $G_2 - G_3 - C_2 - C_3 - P_2 + m_2 > 0$ 时, 博弈系统最终会演化至稳定均衡点 $(0, 0, 1)$, 即“弱监管\转嫁治理\自主治理”。

$G_2 - G_3 - C_2 - C_3 - P_2 + m_2 > 0$ 表明下游地方政府面临是负外部性可能较大, 选择“自主治理”策略带来的收益更大; 同时, 上级政府对下游地区的奖励充足促使下游地方政府更倾向于选择积极治理策略。

(3) 长江上游地方政府面临高生态补偿额和高奖励, 下游地方政府面临较大正外部性、低生态补偿额和低奖励情景

结论 3 当 $R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1 > 0$, $G_1 - G_2 - C_2 - P_2 + m_2 < 0$ 时, 博弈系统最终会演化至稳定均衡点 $(0, 1, 0)$, 即“弱监管\自主治理\放弃治理”。

$R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1 > 0$ 表明长江上游政府进行生态治理时获得的总收益足够高, 能够抵消其面临的治理成本, 与此同时上游地方政府获得的生态补偿额和奖励足够高, 上游政府具有选择自主治理的动机。 $G_1 - G_2 - C_2 - P_2 + m_2 < 0$ 表明上游地方政府积极治理水污染时, 下游地方政府面临是正外部性可能较大, 在此条件下进行生态治理获得的收益不足以抵消高昂的治理成本, 且上级政府对下游地方政府奖励不足, 下游政府选择放弃治理。

(4) 长江上下游地方政府均面临高生态补偿额和高奖励情景

结论 4 当 $R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1 > 0$, $G_1 - G_2 - C_2 - P_2 + m_2 > 0$ 时, 博弈系统最终会演化至稳定均衡点 $(0, 1, 1)$, 即“弱监管\自主治理\自主治理”。

相较于情景 3, 在情景 4 下, $G_1 - G_2 - C_2 - P_2 + m_2 > 0$, 表明长江下游地方政府进行生态治理时获得的收益非常高, 能够抵消其治理成本, 并获得足够高的奖励。因此, 下游地方政府具有充分的治理动力。

2.3 各级政府策略选择差异分析

2.3.1 上级政府策略选择分析

首先, 上级政府在进行流域水环境监管时, 面临着资源的有限性和管理成本的压力。弱监管意味着上级政府可以减少对下级政府的直接干预, 从而降低监管成本和人力资源的投入, 进而使得上级政府能够将更多的资源投入到其他更为紧迫的领域。其次, 上级政府往往面临信息不对称的问题, 难以全面了解下级政府的实际情况。弱监管可以视为一种策略, 允许下级政府根据自身的实际情况采取灵活的治理措施, 从而减少因信息不对称而导致的政策失效。与此同时, 弱监管为上级政府提供了一个更好的反馈机制, 下级政府在较少的监管条件下, 会更积极地报告其治理效果和问题, 从而为上级政府提供更真实的信息, 帮助其优化政策。最后, 通过弱监管, 上级政府可以激励下级政府发挥自主性和创新能力, 推动下级政府更积极地探索适合本地区的治理模式, 从而提高整体治理效率, 促进政策的顺利实施。

2.3.2 长江上游地方政府策略选择分析

上游地区作为流域的源头, 其生态环境状况直接影响着整个流域的水质与生态平衡, 因此, 其治理行为具

有至关重要的意义,而其决策基础在于其参与流域水污染治理所带来的收益是否高于不治理时的收益。生态补偿是促进上游地区政府参与水污染治理的重要因素,完善的生态补偿机制能够为上游地区政府提供一定的资金补偿,以弥补其治理成本,提高参与治理的积极性,进而使得治理的净收益大于不治理的净收益。其次,设立专项资金、提供奖励机制等财政激励政策极大缓解了上游地方政府面临的成本约束,进而有利于实现鼓励上游地区政府进行水污染治理的目的。最后,上游地区政府在进行策略选择时,还会考虑长期利益。虽然短期内流域水污染治理成本可能较高,但从长远来看,良好的生态环境将带来更多的经济收益及社会福利。因此,上游地区政府需要评估治理带来的长期收益,权衡短期成本与长期利益。

2.3.3 长江下游地方政府策略选择分析

下游地区由于其地理位置因素,其生态环境受上游地区的影响较大,当上游地方政府积极治理水环境时,下游地区能够自然地享受到因上游地区治理带来的正外部性,当上游地方政府消极治理水环境时,下游地区也必然承受因上游地区治理带来的负外部性。若上游地方政府为下游地方政府带来的正外部性较大,下游地方政府可能缺乏进行水污染治理的动力,此时需要更强大的上级政府激励,使得下游地方政府有动力选择改善水环境;若上游地方政府为下游地方政府带来的负外部性较大,下游地方政府将面临高昂的额外治理成本,此时下游地方政府同样面临缺乏自主治理激励的困境。因此,下游政府的决策取决于上级政府激励和外部性的权衡。与此同时,下游地方政府在进行策略选择时,同样会考虑长期利益。虽然短期内流域水污染治理成本可能较高,也可能受到上游地方政府正外部效应影响,但从长远来看,良好的生态环境也会给下游地区带来更多的经济收益及社会福利。

3 仿真分析

3.1 参数设计

本文综合考虑模型适用及数据的可得性和可比性问题,根据《沱湖流域上下游横向生态补偿实施方法(2020)》等政策文件,以沱湖-长江流域为例,对前文所提出的流域治理机制进行模拟仿真,验证本文模型的理论有效性,并探索不同机制设计下的演化路径。

沱湖流域主要包括淮河及沱河两条支流,主要流经宿州市和蚌埠市,如图2所示。2018年,安徽沱湖发生死鱼事件,为明确水体治理责任,改善水体质量。2019年12月,安徽省生态环境厅联合省财政厅拟定并印发了《沱湖流域上下游横向生态补偿实施方法》,治理措施从2020年开始正式实施。沱湖流域上下游补偿主要涉及宿州与蚌埠两市,按月开展水质检测并计算补偿资金。

基于模型内在机制,本文使用 Python (version = 3.11) Numpy 科学计算库,对沱湖-长江流域进行模拟仿真,并详细讨论了其应用场景与情景。上级政府、长江上游地方政府及长江下游地方政府分别对应安徽省、宿州市及蚌埠市。由于本文所探究的协同治理模式内在机制其变量间不存在复杂的等式关联,因此变量设置体现变量间的比例关系即可,并基于真实数据作一定调整。考虑到《沱湖流域上下游横向生态补偿实施方法(2020)》在2020年签署,且2020年全国多地出现不同程度的经济放缓问题,对政策实施造成了一定影响,因此本文使用2020前后三年真实数据。参考跨域协同治理三方博弈的经验值设计^[33]、河流水污染跨域合作治理参数设计^[34]、宿州市和蚌埠市统计年鉴、财政部决算

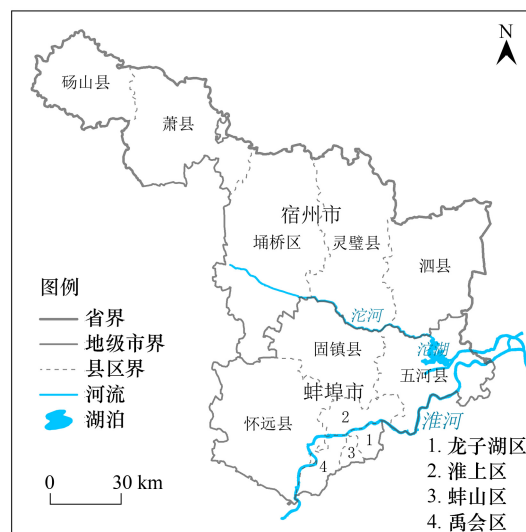


图2 沱湖-长江流域示意简图

Fig.2 Schematic diagram of Tuohu Yangtze River basin

信息等,对模型中的初始参数设计如下(以宿州市获得的生态补偿额为基准单位,即赋值为1)。

(1)对长江上游地方政府(宿州市),在成本方面有 $C_1 = 108, P_1 = 0.6, D_1 = 0$,在收益方面有 $\theta_1 = 28, R_1 - R_2 = 115, m_1 = 0.5$ 。成本方面,采用政策实施后三年宿州市财政局环境保护专项资金和废水治理设施运行费用平均值作为宿州市进行自主治理的总成本,与生态补偿额之比约为 108:1;安徽省弱监管时,宿州市自主治理面临的机会成本范围上限按《安徽省监察委省检察院联合发布行贿犯罪典型案例》平均值计算,赋值为0.6;当地区水污染治理状态不佳时,相关部门将根据实际情况对河长进行扣分,对工作绩效进行量化评估,但在河长制实施过程中,惩罚措施多批评教育和要求整改,对河长的实际性惩罚较少,因此初步将惩罚因子赋值为0。收益方面,流域水污染治理的主要作用是调整产业结构,即改善第一产业,尤其是渔业发展的生态环境环境,抑制传统高排放高污染制造业和推动旅游业发展,因此本文选择渔业、制造业和旅游业收入进行收益分析。本文主要考察进行生态治理后的收益与未进行治理时的收益差额,因此采用政策前后三年收益平均值差额作为赋值基础,同时考虑到经济的发展受多方面因素的影响,技术进步、设备更新、自身发展等因素均有利于拉动经济增长,因此取收益平均值差额的一半进行赋值,即 $R_1 - R_2 = 115$;赋值宿州市获得的经济奖励为0.5。

(2)对长江下游地方政府(蚌埠市),在成本方面有 $C_2 = 8, C_3 = 5, P_2 = 0.8, D_2 = 0$,在收益方面有 $G_1 - G_2 = 30, G_2 - G_3 = 15, m_2 = 0.5, \theta_2 = 0.2$ 。成本方面,由于蚌埠市并无用于水污染治理的环境保护专项资金,因此采用政策实施后三年蚌埠市水利局水利发展建设专项资金和废水治理设施运行费用平均值作为蚌埠市进行自主治理的总成本,与生态补偿额之比约为 8:1;假定当宿州市转嫁治理时,蚌埠市需要额外支付的治理额度为废水治理设施运行费用,故赋值为5;参考对宿州市机会成本和惩罚的分析,初步将蚌埠市面临的机会成本和惩罚因子赋值为0.8和0。收益方面,按照政策实施前后三年收益平均值差额的一半作为赋值基础,即 $G_1 - G_2 = 30$;此外,当长江上下游政府均选择消极治理时,下游地区面临着更糟糕的生态环境,此时蚌埠市总收益较治理时低,损失额度为渔业和旅游业收入的减少值,采用未进行水污染治理时的渔业和旅游业收入对这一情形进行衡量,最终得到 $G_2 - G_3 = 15$;赋值蚌埠市获得的经济奖励为0.5,生态补偿额为0.2。

(3)对上级政府(安徽省)而言,只需要考虑 S_1 大小即可,具体考虑安徽省生态环境厅和水利厅监管成本,将其赋值为3。

3.2 数值仿真分析

据参数设置得 $R_1 - R_2 + \theta_1 + \theta_2 + m_1 - C_1 - P_1 > 0, G_1 - G_2 - C_2 - P_2 + m_2 > 0$ 一定成立,沱湖-长江流域符合长江上下游地方政府均面临高生态补偿额和高奖励情景。设初始时期为0,将各项参数设计带入 Python 中执行模拟运算,得到此时系统的稳定结果如图3所示,可以看出,长江上游地方政府和下游地方政府在策略协同下选择自主治理策略的概率会随着时间的迭代而不断增加,沱湖流域上下游地方政府均会进行流域治理,最终演化至“弱监管\自主治理\自主治理”稳定均衡点,因此沱湖-长江流域模型预测结果为:有流域治理效果,淮河及沱湖的水质有较大改善。

3.3 长江流域水污染治理潜在问题分析

基于模型结果与真实数据验证,本文发现长江流域的激励机制设计存在以下问题:

(1)长江流域河长制制度奖励机制不足、惩罚措施不够。首先,当前的奖励机制尚不完善,缺乏有效的激励措施来鼓励河长积极履行职责。虽然河长在治理水污染方面承担着重要的职责,但在实际操作中,许多河

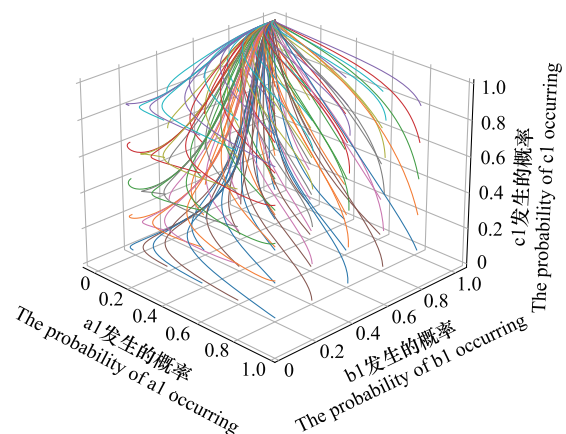


图3 系统模拟结果(沱湖-长江流域)

Fig.3 System simulation results (Tuohu Yangtze River basin)

长并未获得与其付出相匹配的奖励。这种情况导致部分河长对水污染治理缺乏足够的动力,甚至在面对复杂的污染治理问题时,选择消极应对,影响了治理效果。其次,在一些地区,即使河长未能有效推动水污染治理,导致水质恶化,所面临的惩罚往往仅仅是形式上的扣分,缺乏实质性的后果。这种轻微的惩罚无法形成有效的威慑力,导致一些河长在工作中表现出敷衍了事的态度,未能真正将治理工作落到实处。此外,惩罚措施的执行往往缺乏透明度,公众对河长的考核和惩罚过程知之甚少,这也使得河长在工作中缺乏监督和问责,进一步削弱了其履行职责的积极性。最后,河长制的实施往往受到地方政府利益的制约,部分河长在面对水污染问题时,可能会因为地方经济发展与环保之间的矛盾而选择妥协。这种情况下,河长的工作目标与地方政府的利益目标相冲突,导致河长在治理水污染时难以做到真正的尽职尽责。由于缺乏强有力的激励和问责机制,河长在治理水污染的过程中,往往会优先考虑地方经济利益,而忽视水环境的保护,进一步加剧了水污染问题的严重性。

(2) 流域生态补偿激励机制不合理。首先,地方政府参与流域治理的横向补偿激励机制不够合理,导致地方政府在水污染治理中的积极性不足。当前,流域内各地方政府在水资源管理和污染治理中,往往只关注本地区的短期经济利益,而忽视了跨区域的生态效益。这种情况下,地方政府在治理水污染时缺乏足够的横向激励,难以形成合力,导致治理效果不理想。各地方政府之间的利益博弈使得生态补偿的分配和使用缺乏合理性,影响了流域治理的整体协同。其次,横向生态补偿额度标准在不同地区存在差异,不仅造成了地方政府在治理水污染时的资金不平衡,也加剧了地区间的资源分配不公,进一步影响了流域内的协同治理。地方政府在面对水污染问题时,可能因补偿标准的不一致而产生消极情绪,进而影响其治理的积极性和主动性。同时,生态补偿标准时有调整,地方政府可能会因为担心未来的补偿额度减少而选择减少对水污染治理的投入,形成“短视行为”,导致地方政府在治理过程中难以进行长期规划和资金安排,影响了治理工作的连续性和有效性。尤其是在治理周期较长的项目中,补偿标准的变化可能导致地方政府在项目推进过程中面临资金不足的风险,进而影响项目的实施效果。最后,纵向补偿占比较大的现象较为明显。虽然纵向补偿在某种程度上能够缓解地方政府在治理水污染过程中的资金压力,但过于依赖纵向补偿,往往导致地方政府对自身治理责任的依赖性增强,缺乏主动性,使得地方政府在水污染治理中偏向于将重点放在争取上级政府的补偿上,而忽视了通过自身努力提升治理能力和效果的重要性。长期以来,这种依赖关系导致地方政府在生态环境保护方面的积极性降低,治理成效难以提升。

3.4 长江流域水污染治理激励机制设计

为解决长江流域水污染治理存在的潜在问题,本文继续探讨生态补偿和河长制奖惩制度差异化下,长江流域各级政府策略选择演化规律。

为分析生态补偿对下级政府演化博弈过程 and 结果的影响,保持其他变量参数不变,对 θ_1 分别赋值为 1、10、20,复制动态方程组随时间演化 50 次的仿真结果如图 4 左图所示;保持其他变量参数不变,对 θ_2 分别赋值为 1、10、20,复制动态方程组随时间演化 50 次的仿真结果如图 4 右图所示。可知,在系统演化至稳定点的过程中,提高对上游地方政府的生态补偿额度能够加快其自主治理的演化速度,随着 θ_1 的增加,长江上游地方政府自主治理的概率增加,增强的经济激励能够有效促进上游地区积极参与水污染治理。但提高对下游地方政府的生态补偿额度并不能加快下游地方政府自主治理的演化速度,随着 θ_2 的增加,长江下游地方政府自主治理的概率并无明显变化。因此,在设计生态补偿政策时,必须更加关注长江上游地区政府的激励机制,加大对长江上游地区政府的补偿额度,使其有动力进行积极的流域水污染治理工作,实现良好的流域水环境。

为分析上级政府对下级政府的奖励变化对演化博弈过程 and 结果的影响,保持其他变量参数不变,对 m_1 分别赋值为 1、10、20,复制动态方程组随时间演化 50 次的仿真结果如图 5 左图所示;保持其他变量参数不变,对 m_2 分别赋值为 1、10、20,复制动态方程组随时间演化 50 次的仿真结果如图 5 右图所示。可知,随着 m_1 的增加,长江上游地方政府自主治理的概率轻微上升,但可看作无明显变化,上游政府在流域水污染治理中并未得到有效激励。随着 m_2 的增加,长江下游地方政府自主治理的概率增加,适当的经济激励能够有效促进下游政

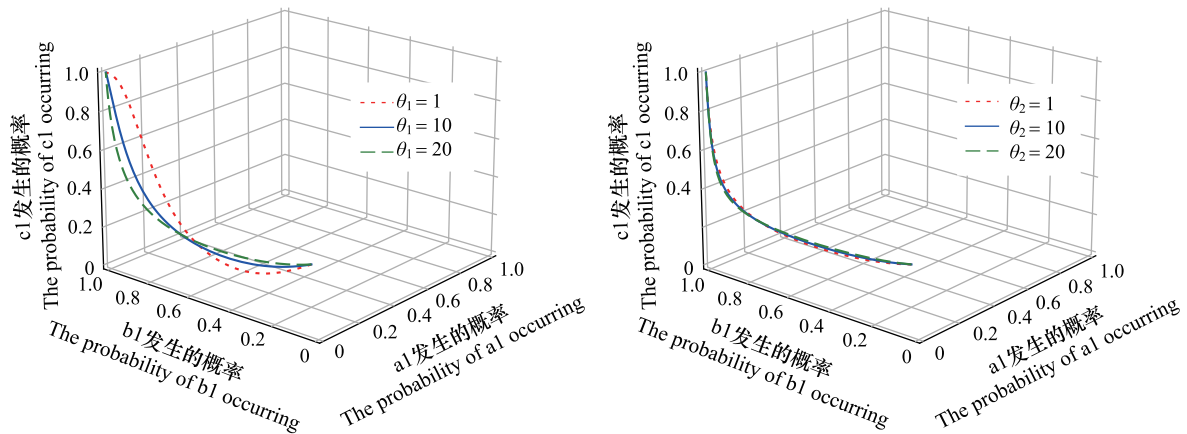


图 4 生态补偿对下级政府演化博弈过程和结果的影响

Fig.4 The impact of ecological compensation on the evolutionary game process and outcomes of local governments

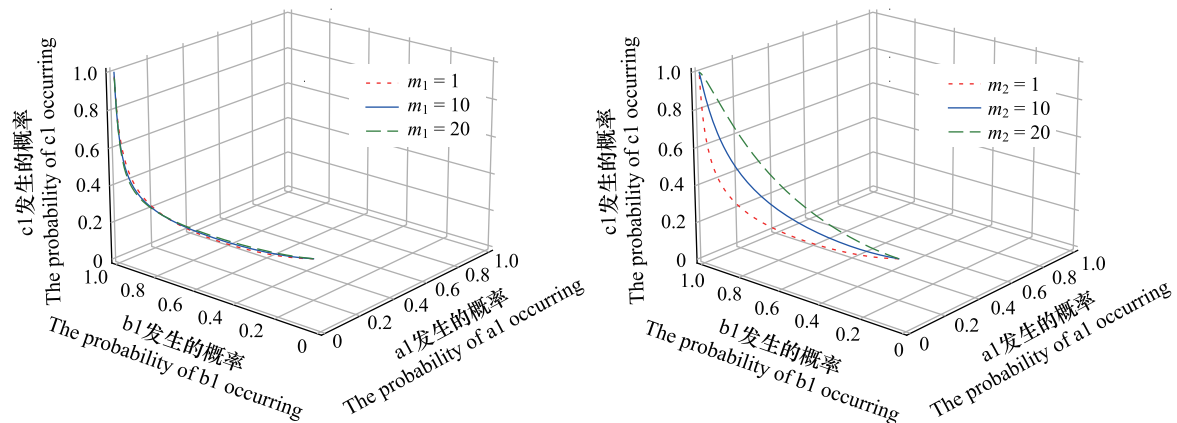


图 5 奖励机制对下级政府演化博弈过程和结果的影响

Fig.5 The impact of reward mechanisms on the evolutionary game process and outcomes of local governments

府在水污染治理中的主动参与。因此,上级政府必须加大对下游地方政府的奖励力度,以鼓励下游地方政府在保护水环境方面做出更多努力,激发其在流域水污染治理工作中的积极性和主动性。

为分析上级政府对下级政府的惩罚变化对演化博弈过程和结果的影响,保持其他变量参数不变,对 P_1 分别赋值为 1、10、20,复制动态方程组随时间演化 50 次的仿真结果如图 6 左图所示;保持其他变量参数不变,对 P_2 分别赋值为 1、10、20,复制动态方程组随时间演化 50 次的仿真结果如图 6 右图所示。可知,在系统演化至稳定点的过程中,提升对下级政府的惩罚力度并未能有效加快各级政府自主治理的演化速度。随着惩罚力度的增加,长江上游地方政府和下游地方政府的自主治理概率没有任何增加的趋势,反而呈现出递减趋势。这一现象表明,单纯依赖惩罚措施来促使政府积极治理水污染的效果有限,甚至降低了下级政府治理的积极性和主动性。因此,上级政府对下级政府的惩罚措施在实际工作中的作用显得相对微弱。建议上级政府应更多地关注激励机制的设计,而非仅仅依赖惩罚手段,通过建立合理的激励与奖励体系,更好地调动各级政府的积极性,从而推动整体流域水环境的改善与可持续发展。

因此,本文尝试提供这样一种激励机制设计:首先,由上级政府牵头制定地方政府间横向补偿标准及实施细则,具体应当包括补偿标准额度提升及补偿标准制定。充分考虑地区经济条件和财政承受能力,以确保所设定的横向补偿最低额度既具有实际可行性,又能有效激励地方政府积极参与生态保护与治理工作。特别地,需要将生态补偿额度向上游地区倾斜。采用动态监测与对比评估的方法来确定补偿依据,即选择每年的

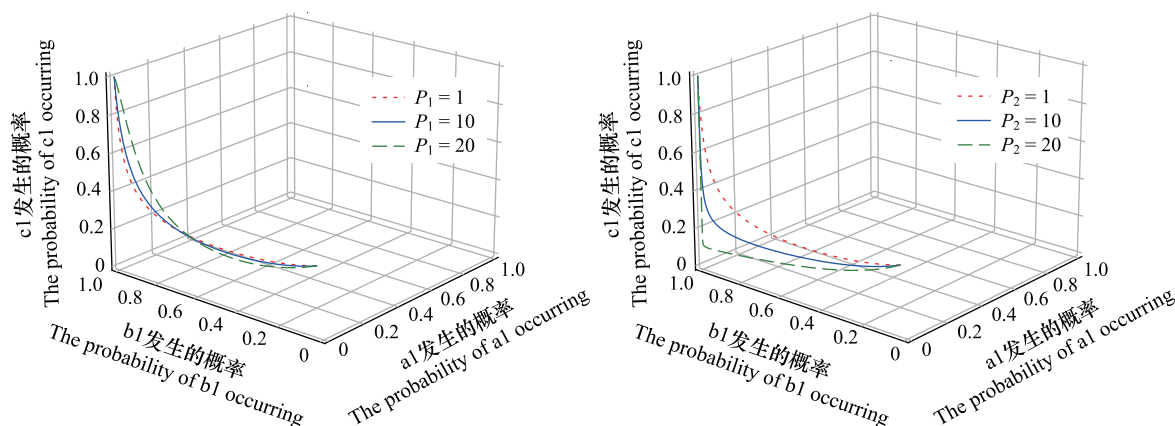


图6 惩罚机制对下级政府演化博弈过程和结果的影响

Fig.6 The impact of punishment mechanisms on the evolutionary game process and outcomes of local governments

夏季与去年夏季同期,或每年的冬季与去年冬季同期流域治理数据进行治理效果衡量,进而减少自然规律带来的影响。其次,针对河长制在实施过程中存在的问题,应进行制度优化与革新,明确界定河长的职责范围与权限边界,通过制定详尽的职责清单与权限指南,为河长们提供清晰的工作指引与行动依据,推动提高河长的工作效率,有效规避职能重叠和责任推诿现象的发生。建立科学、公正的考核与奖惩机制,激励河长们积极履行职责,确保河长制的持续有效运作,特别应当建立完善的奖励制度,以表彰在河流治理和保护方面表现突出的河长,鼓励其在工作中不断创新和改进。同时,也应加强河长制的权威性,确保其在实施过程中的有效性和公信力。

4 结论

流域水污染治理是一项高度复杂且涉及多层级、多部门的综合性任务,它不仅要求各层级政策的全面支持,还面临着跨省市管理所带来的巨大挑战。不同省市之间在经济发展水平、产业结构、资源禀赋等方面存在差异,这导致在流域治理过程中,各方对于政策的理解和执行可能存在偏差,甚至产生利益冲突,使得在流域治理过程中上下级部门和同级部门之间的对接充满不确定性。在这种跨区域的治理模式下,如何化解利益冲突,确保政策的有效实施,并产生“1+1>2”的效果,成为了一个重要课题。

本文将河长制嵌入生态补偿制度中,聚焦协同策略差异化,研究不同策略情景下长江流域水污染治理激励机制。通过构建上级政府、长江上游地方政府、长江下游地方政府三方演化博弈模型,探讨了不同策略情景下的模型内生机制,并以沱湖-长江流域真实数据为例进行模拟仿真,由此设计长江流域水污染治理激励机制。研究发现:

(1) 基于监管成本、真实反馈和长效合作等目的考虑,上级政府最终会倾向于弱监管;影响上游地方政府治理策略选择的因素主要包含生态补偿额和奖励机制;影响下游地方政府治理策略选择的因素主要包含流域外部性和奖励机制。

(2) 在其他条件不变的情况下,提高对长江上游地方政府的生态补偿额将极大地推动上游地方政府选择积极的水污染治理行为,补偿额度越高,上游地方政府治理动力越高。而对下游地方政府的补偿额度并不能激励下游政府选择积极的治理措施。因此应完善生态补偿制度,加大对长江上游地方政府的补偿额度,使其有动力进行积极的流域水污染治理工作,改善流域水环境质量。

(3) 在其他条件不变的情况下,提高对下游地方政府的奖励能够促进下游地方政府进行流域水污染治理,且奖励越高,地方政府进行流域水污染治理的动机越强,但提高对上游地方政府的奖励对上游地方政府行为选择没有明显影响;在其他条件不变的情况下,提高对下级政府的惩罚力度对其行为选择无明显效果,严厉

的惩罚措施还会抑制地方政府的治理积极性。整体而言,上级政府对下级政府的惩罚措施在实际工作中的作用较小,激励机制的使用带来的作用效果更显著。

因此,要以习近平生态文明思想为指导,坚定不移走生态优先、绿色发展之路,加强顶层设计,对原有法律法规实施效果进行评估,通过简化、废除、取代、优化等不同方式完善流域治理的法律法规体系。树牢“一盘棋”思想,从加强流域管理的机构和人员建设、共享先进科学技术、丰富流域治理手段、强化流域治理监管体系、培育全社会生态文明价值观念等方面入手,部署流域河湖保护治理重点任务,凝聚流域区域部门治水管水合力,加快我国流域水污染治理的进程,推进实现我国生态文明建设。

参考文献 (References):

- [1] 段学军, 邹辉, 王晓龙, 蔡永久, 赵中华, 颜蔚, 温舒珂. 大河岸线生态完整性内涵及评估方法——以长江岸线为例. 生态学报, 2023, 43(14): 5788-5801.
- [2] 沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(11): 3937-3951.
- [3] Song W M, Chen M X, Tang Z P. A 10-m scale chemical industrial parks map along the Yangtze River in 2021 based on machine learning. Scientific Data, 2024, 11(1): 843.
- [4] 陈进, 尹正杰. 长江流域生态补偿的科学问题与对策. 长江科学院院报, 2021, 38(2): 1-6.
- [5] Tsani S, Koundouri P, Akinsete E. Resource management and sustainable development: a review of the European water policies in accordance with the united nations' sustainable development goals. Environmental Science & Policy, 2020, 114: 570-579.
- [6] Shang W X, Gong Y C, Wang Z J, Stewardson M J. Eco-compensation in China: theory, practices and suggestions for the future. Journal of Environmental Management, 2018, 210: 162-170.
- [7] Pang J, Chu Z L, Xu K, Luan J, Hu Y. The conditionality of wetland ecological compensation: supervision analysis based on game theory. Water, 2023, 15(13): 2356.
- [8] 罗万云, 周杨, 王小娟. 生态公平视域下额尔齐斯河流域生态补偿标准及空间选择. 生态学报, 2024, 44(21): 9751-9766.
- [9] Zhang X L, Niu C H, Ma S, Wang L J, Hu H B, Jiang J. Exploring ecological compensation standards in the urbanization process: an ecosystem service value-based perspective. Ecological Indicators, 2024, 166: 112510.
- [10] 王健, 曹巍, 黄麟. 基于水供需服务流及外溢价值核算的太湖流域横向生态补偿机制. 生态学报, 2024, 44(3): 955-965.
- [11] Zhang Y, Zhang D J. Efficiency measurement and influencing factors of ecological compensation: a case study from Wuqi and Zhidan on the Loess Plateau. Natural Resources Research, 2021, 30(6): 4905-4921.
- [12] 黄文佳, 杨柏寒. 新安江流域生态补偿政策对绿色水资源利用效率的影响. 长江流域资源与环境, 2024, 33(9): 1969-1981.
- [13] 官冬杰, 姜亚楠, 严聆云, 周健, 和秀娟, 殷博灵, 周李磊. 基于生态足迹视角的长江流域生态补偿额度测算. 生态学报, 2022, 42(20): 8169-8183.
- [14] 任以胜, 龙一鸣, 陆林. 流域生态补偿政策对受偿地区水污染强度的影响——以新安江流域为例. 经济地理, 2023, 43(11): 181-189.
- [15] Wan L, Zheng Q Q, Wu J, Wei Z Y, Wang S Y. How does the ecological compensation mechanism adjust the industrial structure? Evidence from China. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113839.
- [16] 杨永亮, 王维, 覃琼霞. 跨界流域生态补偿与受偿县域经济增长——基于新安江第三轮生态补偿的准自然实验. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2923-2936.
- [17] Verde Selva G, Pauli N, Kiatkoski Kim M, Clifton J. Can environmental compensation contribute to socially equitable conservation? The case of an ecological fiscal transfer in the Brazilian Atlantic forest. Local Environment, 2019, 24(10): 931-948.
- [18] 张益豪, 郭晓辉. 横向生态补偿能缩小城乡收入差距吗? 经济与管理研究, 2024, 45(6): 3-18.
- [19] 詹国彬, 陈健鹏. 走向环境治理的多元共治模式: 现实挑战与路径选择. 政治学研究, 2020(2): 65-75.
- [20] Chen Z G, Meng Q Y, Wang H C, Xu R W, Yi Y X, Zhang Y. Dynamic optimal control differential game of ecological compensation for multipollutant transboundary pollution. Complexity, 2021, 2021(1): 5530971.
- [21] 潘华, 周小凤. 长江流域横向生态补偿准市场化路径研究——基于国土治理与产权视角. 生态经济, 2018, 34(9): 179-184.
- [22] 任以胜, 陆林, 虞虎, 朱道才. 尺度政治视角下的新安江流域生态补偿政府主体博弈. 地理学报, 2020, 75(8): 1667-1679.
- [23] 张振波, 闫钊, 金太军. 官员生态问责对河长制政策成效的影响及作用机制. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(8): 70-79.
- [24] 黄万华, 辛鑫, 黄轲, 高红贵, 周长征. 长江流域“政区单元”河长制政策效果模拟与仿真研究. 中国环境管理, 2024, 16(5): 103-117.
- [25] 王江, 王鹏. 流域府际生态协同治理优于属地治理的证成与实现——基于动态演化博弈模型. 自然资源学报, 2023, 38(5): 1334-1348.
- [26] Kim J S, Batey P W J, Fan Y T, Zhong S. Embracing integrated watershed revitalization in Suzhou, China: learning from global case studies. Asia-Pacific Journal of Regional Science, 2021, 5(2): 565-595.
- [27] 蒙士芳, 魏淑艳. 地方政府生态环境问题整改何以低效? ——基于中央环保督察集中通报典型案例的质性分析. 东北大学学报: 社会科学版, 2023, 25(5): 68-78.
- [28] 冯兴华, 钟业喜, 李建新, 黄洁. 长江流域区域经济发展差异及其成因分析. 世界地理研究, 2015, 24(3): 100-109.
- [29] Friedman D. Evolutionary games in economics. Econometrica, 1991, 59(3): 637-666.
- [30] Ritzberger K, Weibull J W. Evolutionary selection in normal-form games. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1995, 63(6): 1371-1399.
- [31] Lyapunov A M. The general problem of the stability of motion. International Journal of Control, 1992, 55(3): 531-534.
- [32] Sterner T. Fuel taxes: an important instrument for climate policy. Energy Policy, 2007, 35(6): 3194-3202.
- [33] 肖加元, 潘安. 基于水排污权交易的流域生态补偿研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7): 18-26.
- [34] 杨悦, 刘翼, 卢全莹, 张卓颖. 河流水污染跨区域合作治理机制研究——基于三方演化博弈方法. 系统工程理论与实践, 2023, 43(6): 1815-1836.