

# 黄河流域污染治理的环境规制策略 演化博弈研究

李国平<sup>1</sup>, 延步青<sup>1</sup>, 王奕淇<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 经济与金融学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**黄河流域污染治理的环境规制策略选择是中国推进黄河流域协同治理的关键问题,构建中央政府、地方政府和污染企业三方主体的演化博弈模型,通过数值仿真探究各方主体的环境规制策略演化,并引入公众参与的声誉损失模型,探讨公众参与下三方主体环境规制的博弈策略选择。研究发现:在中央政府选择宽松监管、地方政府选择执行环境规制、企业选择治污的情形下,三方主体可达到理想的演化稳定策略均衡,且各主体行为策略选择只受稳定性条件中参数取值的影响,不受各主体选择概率的影响;而公众参与可促使企业以更快的速度演化至治污状态,使理想的演化稳定策略均衡提前到达。为强化黄河流域污染治理的环境规制政策效果,提出了政策建议:一是完善中央政府对黄河流域沿线地方政府的奖惩机制;二是强化黄河流域沿线地方政府的环保履责;三是落实黄河流域沿线城市中污染企业治污的主体责任。

**关键词:**黄河流域;生态环境保护;协同治理;环境规制策略;演化博弈;数值仿真

**中图分类号:** F205; C939

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-0398(2022)02-0074-12

## 一、问题提出与背景概述

2019年9月,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上发表重要讲话,提出黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略,需注重保护和治理的协同性,共同抓好大保护,协同推进大治理<sup>[1]</sup>。2021年3月,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出,深入实施区域重大战略,推动区域重大战略取得新的突破性进展,扎实推进黄河流域生态保护和高质量发展<sup>[2]</sup>。虽然当前黄河流域生态环境治理已取得不少成效,但仍存在生态环境脆弱,局部地区生态系统退化、水源涵养功能降低,水土流失严重、人均水资源占有量低等问题。生态环境脆弱与资源的高负载是黄河流域的基本态势,环境规制作为治理污染的重要政策工具,在推进生态保护和高质量发展中发挥重要作用<sup>[3-4]</sup>。我国的环境规制由中央政府统一制定并由地方政府执行<sup>[5]</sup>,而地方政府为了本地区利益往往会选择忽视环境治理,甚至与污染企业存在共谋行为,环境规制被地方政府作为争夺流动性资源的博弈工具,中央与地方政府在环境规制方面存在非合作博弈关系<sup>[6]</sup>。如何选择合理的环境规制策略、形成“中央指导、地方推动和企

收稿日期: 2021-05-20

基金项目: 国家社会科学基金项目(18CGL028)

作者简介: 李国平(1955—),女,西安交通大学经济与金融学院教授,博士生导师。

业执行”的理想化合作博弈,已成为推进黄河流域的协同治理、实现黄河流域高质量发展的关键问题。

环境规制作为政府社会性规制的重要内容,其执行过程中涉及多重共治主体的利益博弈和策略选择<sup>[7]</sup>,有限理性共治主体的行为策略大多是通过反复试错和学习模仿优化自身行为,最终达到一种稳定的状态<sup>[8-9]</sup>,这种特征决定了环境规制问题适宜用演化博弈方法进行研究<sup>[10]</sup>。国内外学者对于环境规制共治主体的策略演化博弈研究主要集中在以下4个方面。

### (一) 地方政府间的环境规制策略

朱平芳等<sup>[11]</sup>提出地方政府会通过竞相降低环境规制强度来发展本地经济,进而出现“逐底竞赛”的环境规制竞争效应。潘峰等<sup>[12]</sup>通过建立地方政府间的演化博弈模型,对未引入和引入约束机制两种情景下的地方政府环境规制策略进行研究。亚历山德拉(Aleksandra)等<sup>[13]</sup>对合作各方减缓气候变化的演化博弈进行分析,认为只有参与者的协调行动策略才能减缓温室气体排放。汪明月等<sup>[14]</sup>通过构建地方政府间减排演化博弈模型,对环境规制下政府间的合作减排的策略演化过程进行仿真模拟。

### (二) 地方政府与企业的环境行为

金帅等<sup>[15]</sup>对政府环境监管过程中企业环境行为的动态演化进行研究,探究在政府实施动态惩罚机制下企业环境行为的规制策略。张娟等<sup>[16]</sup>建立地方政府与企业之间的环境规制博弈模型,并运用数值模拟对不同企业选择绿色技术创新策略的机理进行分析。伊莎贝拉(Izabela)等<sup>[17]</sup>通过构建博弈模型,对政府制定的政策如何影响企业的策略选择进行研究。张骥骧等<sup>[18]</sup>针对流域污染问题,运用演化博弈研究地方政府监管和企业氮减排的策略选择。骆海燕等<sup>[19]</sup>将环境保护税和其他环境规制行为相结合,对地方政府和排污企业的策略互动行为进行研究。

### (三) 中央政府和地方政府之间的环境规制行为

潘峰等<sup>[20]</sup>通过构建中央与地方政府的非对称演化博弈模型,对环境规制中参与者的行为特征进行考察。文卡特(Venkat)<sup>[21]</sup>基于分权视角,对中央政府与地方政府治理环境的问题进行研究。游达明等<sup>[22]</sup>构建了基于竞争视角下的中央与地方政府的演化博弈模型,对博弈双方实现演化稳定策略的作用机制进行研究。曹凌燕<sup>[23]</sup>通过阐释央地政府的演化博弈过程,对政绩考核影响地方环境规制策略的机制进行探究。

### (四) 多重利益关系在环境规制实施过程中的博弈

赵黎明等<sup>[24]</sup>、徐松鹤<sup>[25]</sup>、高明等<sup>[26]</sup>通过构建地方政府、企业、公众三方演化博弈,对环境规制、公众参与和企业环境行为之前的相互影响机理进行探讨。初钊鹏等<sup>[10]</sup>、柳歆等<sup>[27]</sup>、潘峰等<sup>[7]</sup>通过构建公众参与的中央政府和地方政府环境规制演化博弈模型,对三方主体策略行为的影响因素进行研究。

综上所述,学界现有研究多是将中央与地方两级政府或公众作为博弈主体,鲜有学者将中央政府、地方政府与污染企业三方置于同一个博弈分析框架,且同时考虑公众参与的演化稳定均衡。此外,现有文献大多将中央政府的策略选择简单地归结为监管或不监管,但在我国高度重视黄河流域生态环境治理的背景下,中央政府极少出现绝对不监管的情况,其策略选择具有一定的程度问题。在黄河流域污染治理过程中,中央政府、地方政府与污染企业三方主体如何进行环境规制策略博弈?考虑公众参与的演化稳定均衡会如何变化?为回答这些问题,本文将程度变量引入黄河流域污染治理过程中中央政府的策略选择,构建中央政府、地方政府和污染企业三方主体的动态演化博弈模型,通过数值仿真探究各方主体的行为策略选择,并引入公众参与的声誉损失模型,探讨公众参与下中央政府、地方政府和污染企业三方主体的策略选择,希冀为推进黄河流域的协同治理、实现黄河流域高质量发展提供理论依据和政策建议。

## 二、黄河流域污染治理的环境规制策略演化博弈模型

黄河流域污染治理的推进,需要构建以中央政府为主导、地方政府积极执行环境规制和企业积极治污的环境治理体系。考虑到中央政府、地方政府和企业均为有限理性主体,系统内三方主体均具备两个可选策略,企业可选择治理污染和不治理污染,策略集合为{治污,不治污};地方政府可选择执行环境规制和不执行环境规制,策略集合为{执行,不执行};鉴于中央政府愈发重视黄河流域的生态环境保护,将以往研究中央政府{监管,不监管}的策略集合调整为{严格监管,宽松监管},增强模型的真实性和可信度。

### (一) 模型假设

结合黄河流域污染治理的实际情况,提出 4 个模型假设:

**假设 1** 当企业选择“治污”策略时,将在原产量  $Q$  的基础上减产  $N$ ,  $p$  为产品价格,产生治污成本  $C_1$ 。

**假设 2** 当地方政府选择“执行”策略时,产生执行环境规制的成本  $C_2$ ,包括执行环境规制过程中产生的执行成本和经济成本; $R$  为企业治污相较于不治污时地方政府产生的环境净收益; $F$  为地方政府不执行环境规制时受到中央政府的惩罚。

**假设 3** 中央政府监管力度为  $r$ ,  $0 < r \leq 1$ ,当中央政府选择“严格监管”策略时,  $r = 1$ ,产生监管成本  $C_3$ ;当中央政府选择“宽松监管”策略时,  $0 < r < 1$ ,产生监管成本  $rC_3$ 。 $S$  为中央政府对地方政府的转移支付。

**假设 4**  $\alpha$  为地方环境质量水平对全国环境质量水平的影响系数,  $0 < \alpha < 1$ ;  $t$  为对企业征收的综合税率,  $0 < t < 1$ ;  $t_1$  和  $t_2$  分别为企业“不治污”和“治污”时分别征收的较高和较低环保税率,  $0 < t_1, t_2 < 1$ ;  $\lambda$  为地方政府在环境税收中与中央政府的共享比例,  $0 \leq \lambda \leq 1$ ;  $\beta$  为地方政府在央地税收中的分成比例,  $0 \leq \beta \leq 1$ ;  $\theta$  为地方政府将中央政府转移支付补贴给企业的比例,  $0 \leq \theta \leq 1$ 。变量定义详见表 1。

表 1 三方主体变量定义

变量	定义	变量	定义
$C_1$	企业治理污染时投入的成本	$C_2$	地方政府执行环境规制的成本
$C_3$	中央政府严格监管产生的成本	$r$	中央政府的监管力度
$Q$	企业的原产量	$N$	企业的减产量
$p$	单位产品的价格	$t$	综合税率
$t_1$	较高的环保税率	$t_2$	较低的环保税率
$S$	中央政府对地方政府的转移支付	$\theta$	企业从中央政府转移支付中获得的补贴比例
$R$	企业治污相较于不治污时地方政府产生的环境净收益	$F$	地方政府不执行环境规制时受到中央政府的惩罚
$\alpha$	地方环境质量水平对全国环境质量水平的影响系数	$\lambda$	地方政府在环境税收中与中央政府的共享比例
$\beta$	地方政府在央地税收中的分成比例		

### (二) 支付矩阵构建

在前提条件与假设的基础上,可以得到黄河流域污染治理过程中中央政府、地方政府与企业三方主体的支付矩阵,如表 2 所示。为便于计算,令  $A = p(Q - N)$ ,  $B = t_2(Q - N)$ ,  $D = t_1Q$ ,  $E = (1 - t)pN$ 。

表2 三方主体博弈支付矩阵

博弈方			中央政府		
			严格监管( $z$ )	宽松监管( $1-z$ )	
企业	治污 ( $x$ )	地方政府	执行 ( $y$ )	$-C_1 + (1-t)A + \theta S - B;$ $-C_2 + R + t\beta A + (1-\theta)S + \lambda B;$ $-C_3 + \alpha R + t(1-\beta)A - S + (1-\lambda)B$	$-C_1 + (1-t)A + \theta S - B;$ $-C_2 + R + t\beta A + (1-\theta)S + \lambda B;$ $-rC_3 + \alpha R + t(1-\beta)A - S + (1-\lambda)B$
			不执行 ( $1-y$ )	$-C_1 + (1-t)A + \theta S - B;$ $R + t\beta A - F;$ $-C_3 + \alpha R + t(1-\beta)A - \theta S + B + F$	$-C_1 + (1-t)A + \theta S - rB;$ $R + t\beta A - rF + (1-r)(1-\theta)S;$ $-rC_3 + \alpha R + t(1-\beta)A + rF + rB +$ $(r-r\theta-1)S$
	不治污 ( $1-x$ )	地方政府	执行( $y$ )	$(1-t)pQ - D;$ $-C_2 + t\beta pQ + \lambda D + S;$ $-C_3 + (1-\beta)tpQ + (1-\lambda)D - S$	$(1-t)pQ - D;$ $-C_2 + t\beta pQ + \lambda D + S;$ $-rC_3 + (1-\beta)tpQ + (1-\lambda)D - S$
			不执行 ( $1-y$ )	$(1-t)pQ - D;$ $t\beta pQ - F;$ $-C_3 + (1-\beta)tpQ + D + F$	$(1-t)pQ - rD + (1-r)\theta S;$ $t\beta pQ - rF + (1-r)(1-\theta)S;$ $-rC_3 + (1-\beta)tpQ + rF + rD - (1-r)S$

### 三、黄河流域污染治理的环境规制策略演化博弈模型分析

在黄河流域污染治理过程中,三类博弈参与主体均为有限理性,各自的目标函数为效用最大化,并将三类博弈群体的数量标准化为1。企业群体选择治污和不治污的概率分别为 $x$ 和 $1-x$ ,地方政府群体选择执行环境规制和不执行环境规制的概率分别为 $y$ 和 $1-y$ ,中央政府选择严格监管和宽松监管的概率分别为 $z$ 和 $1-z$ ,并满足 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1$ 。

#### (一) 演化过程的均衡点

企业选择治污或不治污的期望收益,以及策略选择的平均期望收益分别为:

$$U_{11} = yz[-C_1 + (1-t)A + \theta S - B] + y(1-z)[-C_1 + (1-t)A + \theta S - B] + z(1-y)[-C_1 + (1-t)A + \theta S - B] + (1-y)(1-z)[-C_1 + (1-t)A + \theta S - rB]$$

$$U_{12} = yz[(1-t)pQ - D] + y(1-z)[(1-t)pQ - D] + z(1-y)[(1-t)pQ - D] + (1-y)(1-z)[(1-t)pQ - rD + (1-r)\theta S]$$

$$\bar{U}_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12}$$

地方政府选择执行环境规制和不执行环境规制的期望收益,以及策略选择的平均期望收益分别为:

$$U_{21} = xz[-C_2 + R + t\beta A + (1-\theta)S + \lambda B] + x(1-z)[-C_2 + R + t\beta A + (1-\theta)S + \lambda B] + z(1-x)(-C_2 + t\beta pQ + \lambda D + S) + (1-x)(1-z)(-C_2 + t\beta pQ + \lambda D + S)$$

$$U_{22} = xz(R + t\beta A - F) + x(1-z)[R + t\beta A - rF + (1-r)(1-\theta)S] + z(1-x)(t\beta pQ - F) + (1-x)(1-z)[t\beta pQ - rF + (1-r)(1-\theta)S]$$

$$\bar{U}_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22}$$

中央政府选择严格监管和宽松监管的期望收益,以及策略选择的平均期望收益分别为:

$$U_{31} = xy[-C_3 + \alpha R + t(1-\beta)A - S + (1-\lambda)B] + x(1-y)[-C_3 + \alpha R + t(1-\beta)A - \theta S + B + F] + y(1-x)[-C_3 + (1-\beta)tpQ + (1-\lambda)D - S] + (1-x)(1-y)[-C_3 + (1-\beta)tpQ + D + F]$$

$$U_{32} = xy[-rC_3 + \alpha R + t(1-\beta)A - S + (1-\lambda)B] + x(1-y)[-rC_3 + \alpha R + t(1-\beta)A + rF + rB + (r-r\theta-1)S] + y(1-x)[-rC_3 + (1-\beta)tpQ + (1-\lambda)D - S] + (1-x)(1-y)[-rC_3 + (1-\beta)tpQ + rF + rD - (1-r)S]$$

$$\bar{U}_3 = zU_{31} + (1-z)U_{32}$$

根据马尔萨斯(Malthusian)方程,黄河流域污染治理过程中,企业、地方政府以及中央政府的复制动态方程分别为:

$$\begin{cases} F(x) = x(1-x)[-C_1 - E + r(D + \theta S - B) + (y+z-yz)(1-r)(D + \theta S - B)] \\ F(y) = y(1-y)\{-C_2 + \lambda D + \theta S + r[F + (1-\theta)S] + x[\lambda(B-D) - \theta S] + z(1-r)(F + (1-\theta)S)\} \\ F(z) = z(1-z)[(1-r)(-C_3 + D + S + F) - y(1-r)(S + F + D) - x(1-y)(1-r)(\theta S + D - B)] \end{cases} \quad (1)$$

复制动态系统的稳定状态是采用行为策略的博弈各方的比例保持在一个稳定不变的水平<sup>[9]</sup>。令式(1)中的 $F(x) = 0, F(y) = 0, F(z) = 0$ ,可得到企业、地方政府和中央政府在博弈过程中存在8个特殊平衡点,分别为 $E_1 = (0, 0, 0), E_2 = (0, 0, 1), E_3 = (0, 1, 0), E_4 = (1, 0, 0), E_5 = (1, 0, 1), E_6 = (1, 1, 0), E_7 = (0, 1, 1), E_8 = (1, 1, 1)$ ,以及1个混合策略均衡点(鞍点) $E^* = (x^*, y^*, z^*)$ 。

## (二)平衡点的稳定性分析

根据李亚普洛夫稳定性理论,系统在均衡点处的渐进稳定性可通过对应的雅可比(Jacobian)矩阵的特征值来判断,当其特征值均小于0时,该均衡点为演化稳定点(evolutionarily stable strategy, ESS)<sup>[10,28]</sup>。再将8个特殊均衡点分别代入雅可比矩阵中,可得到对应雅可比矩阵的特征值表达式。由表3可知,由于 $\lambda_3 = (1-r)C_3 > 0$ 恒成立,因此 $E_7 = (0, 1, 1)$ 和 $E_8 = (1, 1, 1)$ 只能是不稳定点。在满足表4稳定性条件的情况下, $E_1 \sim E_6$ 可能是ESS。

表3 复制动态系统的平衡点及其特征值

平衡点	特征值		
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
(0,0,0)	$-C_1 - E + r(D + \theta S - B)$	$-C_2 + \lambda D + \theta S + r[F + (1-\theta)S]$	$(1-r)(-C_3 + D + S + F)$
(0,0,1)	$-C_1 - E + D + \theta S - B$	$-C_2 + \lambda D + F + S$	$(1-r)(C_3 - D - S - F)$
(0,1,0)	$-C_1 - E + D + \theta S - B$	$C_2 - \lambda D - \theta S - r[F + (1-\theta)S]$	$-(1-r)C_3$
(1,0,0)	$C_1 + E - r(D + \theta S - B)$	$-C_2 + r[F + (1-\theta)S] + \lambda B$	$(1-r)(-C_3 + S + F - \theta S + B)$
(1,0,1)	$C_1 + E - D - \theta S + B$	$-C_2 + \lambda B + F + (1-\theta)S$	$(1-r)(C_3 - S - F + \theta S - B)$
(1,1,0)	$C_1 + E - D - \theta S + B$	$C_2 - r[F + (1-\theta)S] - \lambda B$	$-(1-r)C_3$
(0,1,1)	$-C_1 - E + D + \theta S - B$	$C_2 - \lambda D - F - S$	$(1-r)C_3$
(1,1,1)	$C_1 + E - D - \theta S + B$	$C_2 - \lambda B - F - (1-\theta)S$	$(1-r)C_3$

表4 演化博弈均衡点的稳定性条件

均衡点	稳定性条件	情形
(0,0,0)	$rD + r\theta S < C_1 + E + rB, \lambda D + (1-r)\theta S + rF + rS < C_2, D + S + F < C_3$	情形1
(0,0,1)	$D + \theta S < C_1 + E + B, \lambda D + F + S < C_2, C_3 < D + S + F$	情形2
(0,1,0)	$D + \theta S < C_1 + E + B, C_2 < \lambda D + (1-r)\theta S + rF + rS, C_3 > 0$	情形3
(1,0,0)	$C_1 + E + rB < rD + r\theta S, rF + (1-\theta)rS + \lambda B < C_2, (1-\theta)S + F + B < C_3$	情形4
(1,0,1)	$C_1 + E + B < D + \theta S, \lambda B + F + (1-\theta)S < C_2, C_3 < (1-\theta)S + F + B$	情形5
(1,1,0)	$C_1 + E + B < D + \theta S, C_2 < rF + (1-\theta)rS + \lambda B, C_3 > 0$	情形6



## 四、黄河流域污染治理的环境规制策略演化博弈数值仿真

### (一)三方主体的策略演化博弈仿真

由于黄河流域污染治理的博弈主体的行为策略会受到其他主体决策比例的影响,可通过调整一方博弈主体的初始值对群体策略演化结果进行检验,有效增加仿真结果的可信度<sup>[26]</sup>。将企业  $x$  的初始值分别设定为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 地方政府、中央政府的初始值设定为  $y = 0.5, z = 0.5$ , 三方主体策略演化仿真主要表现在 6 个方面。

#### 情形 1 企业、地方政府和中央政府(不治污,不执行,宽松监管)的策略演化

将参数取值为  $C_1 = C_2 = 10, C_3 = 15, B = 2, D = 4, E = 1, S = 5, F = 2, \theta = \lambda = r = 0.5$ 。在参数取值满足  $rD + r\theta S < C_1 + E + rB, \lambda D + (1-r)\theta S + rF + rS < C_2, D + S + F < C_3$  时,三方主体会倾向于选择(不治污,不执行,宽松监管)的策略演化,此时(0,0,0)为 ESS。说明对企业而言,在企业治污成本、企业减产少获得的税后营业收入、中央政府监管越严格对企业治污时所征收的环境税越高时,或在中央政府监管越宽松,地方政府将中央转移支付补贴企业数额、对企业不治污时所征收的环境税越低时,企业会倾向选择不治污的策略;对地方政府而言,在地方政府执行环境规制的成本越高时,或中央政府监管越宽松,对企业不治污时所征收的环境税、不执行环境规制时受到中央政府的惩罚以及中央政府对地方政府的转移支付越低时,地方政府会倾向选择不执行环境规制的策略;对中央政府而言,在中央政府严格监管产生的成本越高时,或对企业不治污时所征收的环境税、对地方政府的转移支付,以及对地方政府不执行环境规制、给予的惩罚越低时,中央政府会倾向选择宽松监管。同时,随着企业选择治污概率的下降,企业会越快演化至不治污状态,地方政府会慢慢演化至不执行环境规制的状态,中央政府则会越快演化至宽松监管的状态。仿真结果如图 1(a) 所示。

#### 情形 2 企业、地方政府和中央政府(不治污,不执行,严格监管)的策略演化

将参数取值为  $C_1 = C_2 = 10, C_3 = 5, B = 2, D = 4, E = 1, S = 5, F = 2, \theta = \lambda = r = 0.5$ 。在参数取值满足  $D + \theta S < C_1 + E + B, \lambda D + F + S < C_2, C_3 < D + S + F$  时,三方主体会倾向于选择(不治污,不执行,严格监管)的策略演化,此时(0,0,1)为 ESS。说明当中央政府严格监管产生的成本小于对企业不治污时,所征收的环境税、对地方政府的转移支付,以及对地方政府不执行环境规制给予的惩罚三者之和时,中央政府会选择严格监管的策略。同时,随着企业选择治污概率的上升,企业会慢慢演化至不治污状态,地方政府会越快演化至不执行环境规制的状态,中央政府则会越快演化至严格监管的状态。仿真结果如图 1(b) 所示。

#### 情形 3 企业、地方政府和中央政府(不治污,执行,宽松监管)的策略演化

将参数取值为  $C_1 = C_2 = C_3 = 10, B = 2, D = 4, E = 1, S = 5, F = 15, \theta = \lambda = r = 0.5$ 。在参数取值满足  $D + \theta S < C_1 + E + B, C_2 < \lambda D + (1-r)\theta S + rF + rS, C_3 > 0$  时,三方主体会倾向于选择(不治污,执行,宽松监管)的策略演化,此时(0,1,0)为 ESS。说明在地方政府执行环境规制的成本越低时,或中央政府监管越严格,对企业不治污时所征收的环境税、不执行环境规制时受到中央政府的惩罚,以及中央政府对地方政府的转移支付越高时,地方政府会倾向选择执行环境规制的策略。同时,随着企业选择治污概率的下降,企业、地方政府和中央政府分别会更快演化至不治污、执行环境规制、宽松监管的状态。仿真结果如图 1(c) 所示。

#### 情形 4 企业、地方政府和中央政府(治污,不执行,宽松监管)的策略演化

将参数取值为  $C_1 = 5, C_2 = C_3 = 10, B = 2, D = 4, E = 1, S = 15, F = 2, \theta = 0.8, \lambda = r = 0.5$ 。在参数取值满足  $C_1 + E + rB < rD + r\theta S, rF + (1-\theta)rS + \lambda B < C_2, S + F + B < C_3 + \theta S$  时,三方主体会倾向

于选择(治污,不执行,宽松监管)的策略演化,此时(1,0,0)为ESS。说明在企业治污成本、企业减产少获得的税后营业收入、中央政府监管越宽松对企业治污所征收的环境税越低时,或在中央政府监管越严格,地方政府将中央转移支付补贴企业数额、对企业不治污所征收的环境税越高时,企业会倾向选择治污的策略。同时,随着企业选择治污概率的上升,企业会越快演化至治污状态,地方政府会越快演化至不执行环境规制状态,中央政府则会越慢演化至宽松监管状态。仿真结果如图1(d)所示。

#### 情形5 企业、地方政府和中央政府(治污,不执行,严格监管)的策略演化

将参数取值为 $C_1 = 5, C_2 = 15, C_3 = 10, B = 2, D = 4, E = 1, S = 15, F = 2, \theta = \lambda = r = 0.5$ 。在参数取值满足 $C_1 + E + B < D + \theta S, \lambda B + F + (1 - \theta)S < C_2, C_3 < (1 - \theta)S + F + B$ 时,三方主体会倾向于选择(治污,不执行,严格监管)的策略演化,此时(1,0,1)为ESS。说明对企业而言,当企业治污成本、企业减产少获得的税后营业收入、企业治污时被征收的环境税三者之和小于企业不治污时被征收的环境税、企业治污获得的补贴二者之和时,企业会倾向选择治污的策略。对中央政府而言,当中央政府严格监管产生的成本小于地方政府不执行环境规制时中央政府获得的罚金、对治污企业所征收的环境税,以及给予治污企业的补贴三者之和时,中央政府会倾向选择严格监管的策略。同时,随着企业选择治污概率的上升,企业、地方政府和中央政府分别会更快演化至治污、不执行环境规制、严格监管状态。仿真结果如图1(e)所示。

#### 情形6 企业、地方政府和中央政府(治污,执行,宽松监管)的策略演化

将参数取值为 $C_1 = 5, C_2 = C_3 = 10, B = 1, D = 4, E = 1, S = 15, F = 15, \theta = \lambda = r = 0.5$ 。在参数取值满足 $C_1 + E + B < D + \theta S, C_2 < rF + (1 - \theta)rS + \lambda B, C_3 > 0$ 时,三方主体会倾向于选择(治污,执行,宽松监管)的策略演化,此时(1,1,0)为ESS。说明对地方政府而言,当地方政府执行环境规制的成本小于在中央政府监管下,地方政府不执行环境规制受到中央政府的惩罚、地方政府获得的转移支付以及对治污企业征收的环境税三者之和时,地方政府会倾向选择执行环境规制的策略。在该演化稳定点下,只有中央政府给予地方政府较高的转移支付和较重的惩罚,才有利于实现(1,1,0)理想演化稳定均衡。同时,随着企业选择治污概率的下降,企业会越慢演化至治污状态,地方政府会越快演化至执行环境规制状态,中央政府会越快演化至宽松监管的状态。仿真结果如图1(f)所示。

同理,可得地方政府或中央政府变动其初始值、其他两方博弈主体初始值固定时的演化路径。由这些模拟仿真可知,在参数取值满足不同的稳定性条件时,最终的稳定策略点会不同。由于在所有的演化稳定均衡点中,(治污,执行,宽松监管)的策略为理想的演化稳定均衡,因此,在黄河流域污染治理过程中,中央政府可通过提高对地方政府的转移支付,对地方政府不执行环境规制时给予惩罚,以及降低与地方政府在环境税收中的共享比例,促进地方政府积极执行环境规制;地方政府可通过对治污企业征收较低的环保税和不治污企业征收较高的环保税,以及加大对企业治污的补贴,促使企业积极治污。另外,三方主体的策略初始值变化会影响博弈主体的演化速度,但不会改变博弈主体的最终策略选择,详见图1。

### (二)考虑公众参与的声誉损失仿真

在黄河流域环境保护与治理过程中,公众的参与可以弥补市场机制和政府干预的不足,有利于环境污染治理效率的提升,是影响环境污染治理行为的重要因素。对企业而言,企业不治污会给公众带来负外部性损害,公众对企业评价较差,企业遭受声誉损失 $L_1$ ;对地方政府而言,随着信息公开制度的完善,地方政府的不作为会增加公众对地方的不满,地方政府遭受声誉损失 $L_2$ ;对中央政府而言,公众会对中央政府的宽松监管产生不良印象,中央政府遭受声誉损失 $(1 - r)L_3$ 。

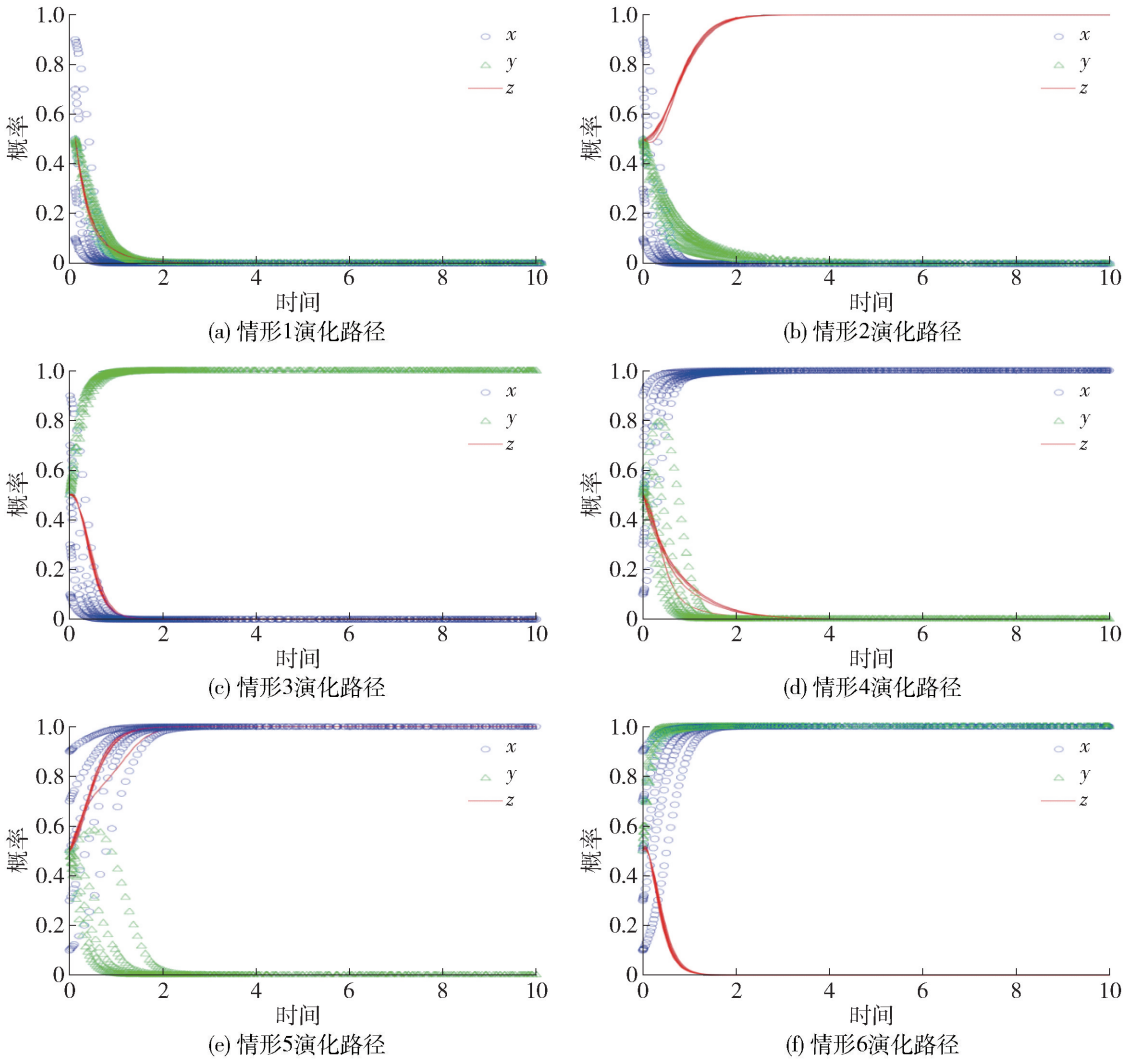


图 1 情形 1~6 的演化路径仿真

引入公众参与后,三方主体的复制动态方程发生变化,调整后的复制动态系统为:

$$\begin{cases} F'(x) = x(1-x) [ -C_1 - E + r(D + \theta S - B) + L_1 + (y+z-yz)(1-r)(D + \theta S - B) ] \\ F'(y) = y(1-y) \{ -C_2 + \lambda D + \theta S + r[F + (1-\theta)S] + L_2 + x[\lambda(B-D) - \theta S - L_2] + \\ z(1-r)[F + (1-\theta)S] \} \\ F'(z) = z(1-z) [ (1-r)(-C_3 + D + S + F + L_3) - y(1-r)(S + F + D + L_3) - \\ x(1-y)(1-r)(\theta S + D + L_3 - B) ] \end{cases} \quad (2)$$

令式(2)中的  $F'(x) = 0, F'(y) = 0, F'(z) = 0$ , 可得到 8 个特殊平衡点和 1 个混合策略均衡点。同理,利用雅可比矩阵的特征值来判断系统在均衡点处的渐进稳定性,将 8 个特殊均衡点分别代入雅可比矩阵中,由此可得到对应雅可比矩阵的特征值表达式。由于  $\lambda_3 = (1-r)C_3 > 0$  恒成立,因此,  $E_7' = (0, 1, 1)$  和  $E_8' = (1, 1, 1)$  只能是不稳定点。在满足稳定性条件的情况下,  $E_1' \sim E_6'$  可能是 ESS。并依据表达式中各参数的取值范围分情形讨论各均衡点的稳定性,详见表 5。

本文重点讨论对于黄河流域污染治理,无公众参与的理想演化稳定均衡  $E_6 = (1, 1, 0)$  和有公众参与的理想演化稳定均衡  $E_6' = (1, 1, 0)$ 。由均衡点的稳定性条件可知,在有公众参与的情境下,企业的策略演化除受到企业治污成本、因减产少获得的税后营业收入、企业治污时和不治污时分别



被征收的环境税,以及企业治污时获得的补贴等因素影响外,还受到公众对其评价的影响。与图2(a)相比,图2(b)中企业以更快的速度演化至治污状态,说明公众参与可有效促进企业选择治污策略,从而达到以中央政府为主导、地方政府积极执行和企业积极治污的理想演化稳定策略。

表5 公众参与下各均衡点的稳定性条件

均衡点	稳定性条件	情形
(0,0,0)	$rD + r\theta S + L_1 < C_1 + E + rB, \lambda D + (1-r)\theta S + rF + rS + L_2 < C_2, D + S + F + L_3 < C_3$	情形1
(0,0,1)	$D + \theta S + L_1 < C_1 + E + B, \lambda D + F + S + L_2 < C_2, C_3 < D + S + F + L_3$	情形2
(0,1,0)	$D + \theta S + L_1 < C_1 + E + B, C_2 < \lambda D + (1-r)\theta S + rF + rS + L_2, C_3 > 0$	情形3
(1,0,0)	$C_1 + E + rB < rD + r\theta S + L_1, rF + (1-\theta)rS + \lambda B < C_2, (1-\theta)S + F + B < C_3$	情形4
(1,0,1)	$C_1 + E + B < D + \theta S + L_1, \lambda B + F + (1-\theta)S < C_2, C_3 < (1-\theta)S + F + B$	情形5
(1,1,0)	$C_1 + E + B < D + \theta S + L_1, C_2 < rF + (1-\theta)rS + \lambda B, C_3 > 0$	情形6

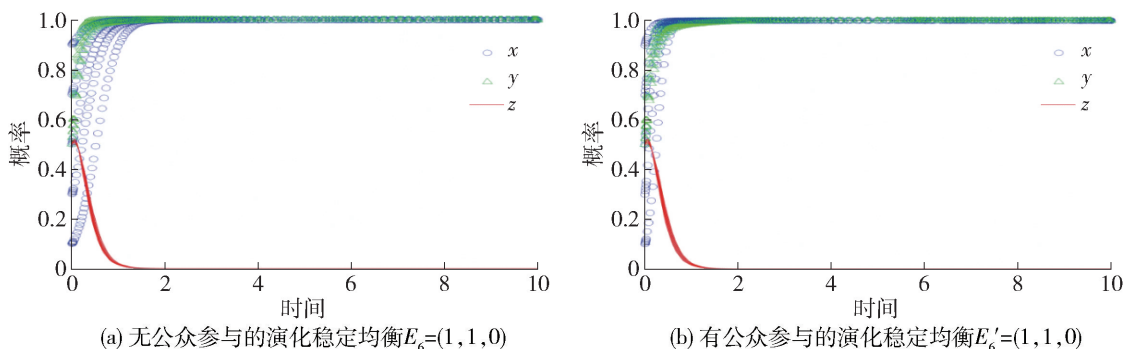


图2 两种情境下理想演化稳定均衡路径仿真

## 五、研究结论与政策建议

本文通过构建黄河流域污染治理环境规制视角下“中央政府—地方政府—企业”三方演化博弈模型,分析了三方主体在黄河流域污染治理过程中的策略演化,并利用数值仿真对演化博弈模型进行实证分析,得到三方面的结论。

### (一) 研究结论

#### 1. 三方主体达到理想的演化稳定策略均衡

在中央政府选择宽松监管、地方政府选择执行环境规制、企业选择治污的情形下,三方主体可达到理想的演化稳定策略均衡。因此,在选择黄河流域污染治理的环境规制策略时,中央政府可通过提高对地方政府的转移支付、对地方政府不执行环境规制时给予的惩罚,以及降低与地方政府在环境税收中的共享比例,促进地方政府积极执行环境规制;地方政府可通过对治污企业征收较低的环保税和对不治污企业征收较高的环保税,以及加大对企业治污的补贴,促使企业积极治污。

#### 2. 各主体最终的行为策略选择不受主体选择概率影响

各主体最终的行为策略选择只受稳定性条件中参数取值的影响,不受各主体选择概率的影响。由前述数值仿真可知,在参数取值确定的情况下,黄河流域中央政府、地方政府和企业的策略演化速度会受到自身和其他两方主体策略选择比例的影响。但无论各主体选择比例的取值如何变化,都不会改变博弈主体的最终行为策略选择,最终都会达到不同稳定性条件下的稳定策略点。

### 3. 公众参与促使企业更快演化治污状态与速度

公众参与可促使企业以更快的速度演化至治污状态,使理想的演化稳定策略均衡提前到达。在公众参与的情境中,企业的策略演化除受到企业治污成本、企业减产少获得的税后营业收入、企业治污时和不治污时分别被征收的环境税、以及企业治污时获得的补贴等因素影响外,还受到公众对其评价的影响。公众的参与会促进企业选择治污策略,使企业以更快的速度演化至治污状态,从而达到以中央政府为主导、地方政府积极执行和企业积极治污的理想演化稳定策略。

#### (二) 政策建议

本文根据研究结论,为强化黄河流域污染治理的环境规制政策效果,特提出三个方面的建议。

##### 1. 完善中央政府对黄河流域沿线地方政府的奖惩机制

由本文演化博弈模型结果可知,中央政府对黄河流域沿线地方政府执行环境规制的奖惩力度,可促进地方政府积极执行环境规制,现行的奖惩依据主要以区间范围,如“明显变好、基本稳定、显著变差”等生态环境状态去设立,容易造成考核与激励约束效果的打折;应改进为更严格的、明确的奖惩依据,例如,依据中国环境监测总站发布的黄河流域重点断面水质监测数据,当水质达到Ⅰ、Ⅱ或Ⅲ类时给予奖励,当水质为Ⅳ、Ⅴ或劣Ⅴ类时给予惩罚,且可根据流域水质变好或变化的程度,确定奖励和惩罚的金额。

##### 2. 强化黄河流域沿线地方政府的环保履责

国家对环保履责不利的地方政府给予的惩罚由行政约谈改为经济处罚,增加地方政府不执行环境规制的机会成本。例如,对黄河流域流经城市的工业废水排放中所含的化学需氧量排放量、氨氮排放量等污染物进行监测,当污染物排放超过其标准限值范围时,对当地地方政府进行经济处罚;同时,将环境绩效考核纳入地方政府的年度政绩考核体系,对地方政府官员任期内的环境质量变化情况进行考核,考核结果作为干部选拔任用和奖惩的依据<sup>[29]</sup>;进一步完善环保追责制度,对即将离任的地方官员进行环保审计,对于监管不力的人员予以追责,强化地方官员重视其任期内的黄河流域污染治理和生态保护问题。

##### 3. 落实黄河流域沿线城市中污染企业治污的主体责任

本研究表明,企业的策略演化受到其被征收的环保税、获得的补贴以及公众评价的影响。一方面,地方政府可实施动态调整的环保税率,对积极治污企业给予环保税收优惠,对污染企业提高环保税的征收标准,通过污染者付费实现生态环境成本的内部化;另一方面,加大对积极治污企业的补贴力度,扶持企业环保技术创新,除了给予直接的资金支持,还可通过股权融资、产业基金、债权融资等方式实现对技术升级改造项目的金融支持;此外,引入公众参与的声誉机制,根据公众对企业的评价,调整对企业奖惩力度,即对于声誉好的企业加大奖励,对于声誉差的企业加大惩罚。

#### 参考文献:

- [1] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 求是, 2019(20): 1-5.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2021-05-06]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [3] 周清香, 何爱平. 环境规制能否助推黄河流域高质量发展[J]. 财经科学, 2020(6): 89-104.
- [4] 王育宝, 陆扬, 王玮华. 经济高质量发展与生态环境保护协调耦合研究新进展[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2019, 19(5): 84-94.
- [5] 张华. 地区间环境规制的策略互动研究——对环境规制非完全执行普遍性的解释[J]. 中国工业经济, 2016(7): 74-90.
- [6] 初钊鹏, 卞晨, 刘昌新, 等. 基于演化博弈的京津冀雾霾治理环境规制政策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(12): 63-75.

- [7] 潘峰, 刘月, 王琳. 公众参与视角下的央地环境规制博弈分析[J]. 运筹与管理, 2020, 29(6): 113-123.
- [8] LEVINE D K, PESENDORFER W. The evolution of cooperation through imitation[J]. Games & Economic Behavior, 2007, 58(2): 293-315.
- [9] 王红梅, 谢永乐, 孙静. 不同情境下京津冀大气污染治理的“行动”博弈与协同因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(8): 20-30.
- [10] 初钊鹏, 卞晨, 刘昌新, 等. 雾霾污染、规制治理与公众参与的演化仿真研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7): 101-111.
- [11] 朱平芳, 张征宇, 姜国麟. FDI 与环境规制: 基于地方分权视角的实证研究[J]. 经济研究, 2011, 46(6): 133-145.
- [12] 潘峰, 西宝, 王琳. 地方政府间环境规制策略的演化博弈分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(6): 97-102.
- [13] ALEKSANDRA M B, SALAHUDDIN M K, MANSOUR A, et al. A mathematical model for the climate change: can unpredictability offset the temptations to pollute[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 265(C): 187-195.
- [14] 汪明月, 刘宇, 杨文珂. 环境规制下区域合作减排演化博弈研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(2): 158-169.
- [15] 金帅, 张洋, 杜建国. 动态惩罚机制下企业环境行为分析与规制策略研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23(S1): 637-644.
- [16] 张娟, 耿弘, 徐功文, 等. 环境规制对绿色技术创新的影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(1): 168-176.
- [17] IZABELA E N, SANI M, SHIB S S, et al. Comparative analysis of government incentives and game structures on single and two-period green supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235(10): 1371-1398.
- [18] 张骥襄, 席轩. 流域排污权交易下地方政府和企业氮减排演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2020(5): 1-13.
- [19] 骆海燕, 屈小娥, 胡琰欣. 环保税制下政府规制对企业减排的影响——基于演化博弈的分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2020, 22(1): 1-12.
- [20] 潘峰, 西宝, 王琳. 环境规制中地方政府与中央政府的演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2015, 24(3): 88-93, 204.
- [21] VENKAT R G. Environmental governance in China[J]. Theoretical Economics Letters, 2016, 6(3): 583-595.
- [22] 游达明, 邓亚玲, 夏赛莲. 基于竞争视角下央地政府环境规制行为策略研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(11): 120-129.
- [23] 曹凌燕. 政绩考核与地方环境规制策略[J]. 统计与决策, 2020, 36(21): 168-172.
- [24] 赵黎明, 陈妍庆. 环境规制、公众参与和企业环境行为——基于演化博弈和省级面板数据的实证分析[J]. 系统工程, 2018, 36(7): 55-65.
- [25] 徐松鹤. 公众参与下地方政府与企业环境行为的演化博弈分析[J]. 系统科学学报, 2018, 26(4): 68-72.
- [26] 高明, 廖梦灵. 雾霾治理中的协作机制研究: 基于演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2020, 29(5): 152-160.
- [27] 柳歆, 孟卫东. 公众参与下中央与地方政府环保行为演化博弈研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(8): 19-26.
- [28] 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, 2020(10): 1-21.
- [29] 任恒. 我国环境问责制度建设中的“党政同责”理念探析[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2018(2): 49-55.

**本刊相关文献链接:**

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 郭朝先. 2060 年碳中和引致中国经济系统根本性变革[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(5): 64-77.
- [3] 吕指臣, 胡鞍钢. 中国建设绿色低碳循环发展的现代化经济体系: 实现路径与现实意义[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(6): 35-43.
- [4] 王育宝, 刘鑫磊, 胡芳肖. 绿色低碳发展背景下中国特色社会主义现代化环境治理体系构建研究[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(6): 44-56.
- [5] 郭施宏, 王雪纯. 中国迈向“双碳”目标的政策执行保障机制研究——来自低碳试点城市的实证经验[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(6): 57-68.
- [6] 薛飞, 周民良. 环境同治下京津冀地区绿色全要素生产率时空演化及影响因素分析[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(6): 69-101.

## Study on Environmental Regulation Strategy Evolutionary Game for Pollution Control in the Yellow River Basin

LI Guoping<sup>1</sup>, YAN Buqing<sup>1</sup>, WANG Yiqi<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Finance, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China;

2. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The choice of environmental regulation strategy for pollution control in the Yellow River basin is the key problem to promote the coordinated control of the Yellow River basin. This paper constructs the evolutionary game model of the central government, local government and polluting enterprises, and explores the evolution of environmental regulation strategies of all parties through numerical simulation. It further introduces the reputation loss model of public participation, and discusses the game strategy selection of environmental regulation of the three parties under public participation. The results show that: when the central government chooses loose regulation, the local government chooses to implement environmental regulation, and the enterprises choose to treat pollution, the three parties can achieve the ideal evolutionary stable strategy equilibrium, and the behavior strategy choice of each subject is only affected by the parameters in the stability condition, not by the selection probability of each subject. The public participation can promote the enterprises to evolve to the pollution control state at a faster speed, and make the ideal evolutionary stable strategy equilibrium arrive ahead of time. In order to strengthen the effect of environmental regulation policy on pollution control in the Yellow River basin, policy suggestions are put forward: firstly, improve the reward and punishment mechanism of the central government for local governments along the Yellow River basin. Secondly, strengthen the environmental protection responsibility of local governments along the Yellow River basin. Thirdly, implement the main responsibility of pollution control of polluting enterprises in cities along the Yellow River basin.

**Key words:** Yellow River basin; ecological environment protection; coordinative governance; environmental regulation; evolutionary game; numerical simulation

(责任编辑:李世红)