

东海陆源污染治理的演化博弈分析

张林姣¹, 沈满洪^{1,2}

(1. 宁波大学商学院 宁波 315211; 2. 浙江省生态文明研究中心 杭州 310018)

摘要:随着工业化和城镇化的推进,陆源污染物的排放量在逐渐增加,东海作为陆源污染的主要接受者,其环境也逐渐恶化。文章基于演化博弈分析方法,从陆源污染的治理主体出发,从企业与地方政府之间、沿海地方政府之间、沿海政府与海岛政府之间以及企业与公众之间建立演化博弈模型,根据复制动态图分析陆源污染治理的主体间的策略演进规律及其影响因素;根据相关因素提出相关策略,使演化博弈的稳定策略向(合作,合作)演化,以促进各主体协同治理陆源污染。

关键词:东海;陆源污染;污染治理;演化博弈;海洋环境

中图分类号:F062.2;P7

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2017)04-0003-10

Evolutionary Game Analysis on Control of Land-based Pollution Sources in the East China Sea

ZHANG Linjiao¹, SHEN Manhong^{1,2}

(1. School of Bussiness, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Center for Ecological Civilization of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With the development of industrialization and urbanization, the emission of terrestrial pollutants is gradually increasing, and the environment of the East China Sea, which is the main recipient of terrestrial pollution, is also deteriorating. Based on the evolutionary game theory, the evolutionary game models were established from four aspects: between the central government and the local government, between the coastal local governments, between the coastal local government and the island local government, and between the government and the enterprise. Evolutionary rule and influencing factors were analyzed according to the replicated dynamical map. The relevant strategies were put forward according to the relevant factors, so that the evolutionary strategy of evolutionary game was evolved to promote the cooperation of various subjects to control the land-based pollution.

Key words: East China Sea, Land-based sources of pollution, Pollution control, Evolutionary game, Marine environment

收稿日期:2016-09-22;修订日期:2017-03-10

基金项目:浙江省哲学社会科学重大招标项目“生态文明制度建设研究”(14YSXK03ZD);国家社科基金重大招标项目“海洋生态损害补偿制度及公共治理机制研究——以中国东海为例”(16ZDA050)。

作者简介:张林姣,硕士研究生,研究方向为产业创新与可持续发展、环境经济学,电子信箱:778237536@qq.com

通信作者:沈满洪,教授,博士,研究方向为资源与环境经济学、生态文明建设理论与政策,电子信箱:smh@nbu.edu.cn

1 引言

随着工业化和城镇化的推进,中国的经济发展取得前所未有的成果,同时水污染状况形势异常严峻。污水排海是当前沿海地区废水排放的重要途径,然而海洋纳污能力有限,一旦超过其承载力,就会出现对海洋环境的破坏^[1]。根据 2006—2014 年《中国近岸海域环境质量公报》,东海的四类及劣四类海水水质面积从 2006 年的 52.2% 到 2014 年的 62.1%,有逐渐上升的趋势,且四类及劣四类海水水质面积的比例远远大于其他三大海域,表明东海海洋环境在逐渐恶化。在海洋污染源中,陆源污染约占海洋污染的 80%,已变成海洋污染的罪魁祸首^[2],对陆源污染的治理刻不容缓。海洋污染及陆源污染属于公共问题,有效治理陆源污染从而减轻海洋污染,需要政府、企业、公众多主体的共同参与,但各主体间存在利益博弈。为促进各主体共同治理,运用演化博弈的方法极具意义,因此本文从演化博弈的视角分析各主体的行为选择和策略路径,并解释各主体选择不合作策略的原因,针对原因提出相关对策建议。

国内外学者对环境污染治理的主体行为策略的研究主要选取监管者、污染产生者、污染治理的监督者这 3 个利益主体,可以将其划分为中央政府与地方政府之间的博弈^[3]、地方政府之间的博弈^[4]、地方政府与企业之间的博弈^[5-6]、企业与公众之间的博弈^[7]。在中央政府与地方政府之间的博弈方面,余敏江^[8]认为破解“智猪博弈”需要科学划分中央与地方政府在生态治理上的事权、财权,全面引入“绿色 GDP”绩效评价指标体系,逐步实现“区域限批”制度化,不断完善生态治理问责制度,进一步健全生态补偿机制;在政府与企业之间的博弈方面,刘洋^[9]用“囚徒困境”分析经济水平不同的地方政府间和经济水平不同的地方政府间的跨区域环境治理,得出个人理性的提高和设立奖惩机制都有助于走出“囚徒困境”。在政府与企业之间的博弈方面,张学刚^[10]认为减少政府因企业污染带来的收益、降低政府监管成本、加大对企业污染的处罚等有助于环境质量的改善,而且建立以增加企业污染的声誉成本以及提高地方政府纵容污染的政治成

本等非物质成本的制度是改善环境质量的重要方向。在企业与公众之间的博弈方面,杜建国^[11]用演化博弈的方法分析环境污染中公众与企业的行为,认为公众参与下的企业环境行为路径演化系统既可以向良好状态演化,也可以“锁定”于不良状态;通过调节模型中的参数可以跳出不良“锁定”状态,应加大环保宣传力度、建立网上公共平台、加大对企业的罚款力度、鼓励新技术开发。

综合以上的研究结果可以发现,目前的研究多以博弈主体的完全理性为假设条件来分析治理主体的行为,并且以政府和企业之间的博弈为主,涉及多主体之间的污染治理博弈较少,用博弈的方法具体到陆源污染治理领域的几乎没有。鉴于在现实中博弈主体难以达到完全理性,策略的学习往往是长期不断学习和调整的结果,因此本文用有限理性的演化博弈方法,重点从企业与地方政府之间、沿海地方政府之间、沿海政府与海岛政府之间以及企业与公众之间 4 个层面构建演化博弈模型,分析陆源污染治理主体间的策略演进,并分析当前主体选择不治理策略的原因,以期为促进治理主体共同治理陆源污染提供理论依据。

2 政府与企业之间的博弈

东海陆源污染物的偷排漏排现象屡见不鲜。政府和企业追求的目标有所不同,企业追求利润最大化,选择治污就需要进行环保投资,对其利润造成损失;为逃避治污的高昂成本,企业选择被罚款也不治理,因为对企业来说不治理的利润显然高于治理的利润。而政府的目标函数里包括公众利益和 GDP 考核中的经济利润,政府一方面必须考虑环境污染给公众带来的影响,避免舆论压力;另一方面在中央考评机制中经济收入这一指标也非常重要,而地方政府的主要收入来源于企业的税收,企业利润的降低会影响政府的财政收入,因此政府作为监管者与企业之间存在博弈关系。

2.1 博弈假设

假设 1:有政府和企业这 2 个群体,参与治理陆源污染的政府和企业都是有限理性人,政府和企业 2 个群体进行策略交往。政府选择监管的概率为 x 、选择不监管的概率为 $(1-x)$,企业选择治理污染

的概率为 y 、选择违法排污的概率为 $(1-y)$ 。

假设 2:企业正常情况下的收益为 W_1 ,若非法排污,用治理投资的成本可以增加生产的投入,增加企业的产品利润,非法排污后的收益为 W'_1 , $W'_1 > W_1$;企业投入污染治理费用为 C_1 ,企业不进行排污治理,被政府监管部门发现后,不但要求其治理还要罚款 F ,在不进行污染治理时,只要监管部门监管就一定会被发现。政府正常情况下的收益为 W_2 ,实行监管需要投入成本为 C_2 ,若政府不监管,企业选择非法排放,则政府会降低社会信誉,损失为 G ;企业非法排污因不治理污染导致成本降低而利润上升,使政府增加税收 S ,但会因为陆源污染量增加导致损失 L 。陆源污染量的减少会给政府带来收益为 Q 。

根据以上假设,博弈支付矩阵如表 1 所示。

表 1 沿海政府与企业之间的博弈支付矩阵

政府(x)	企业(y)	
	治理污染(y)	非法排污($1-y$)
监管(x)	$(W_2 - C_2 + Q, W_1 - C_1)$	$(W_2 - C_2 + F + S - L, W'_1 - C_1 - F)$
不监管($1-x$)	$(W_2 + Q, W_1 - C_1)$	$(W_2 - G + S - L, W'_1)$

2.2 演化博弈分析

根据表 1 计算出,企业治理污染和非法排污的期望收益以及平均收益分别为 $U_1, U_2, \bar{U}_1$:

$$U_1 = (W_1 - C_1)x + (W_1 - C_1)(1-x) = W_1 - C_1 \quad (1)$$

$$U_2 = (W'_1 - C_1 - F)x + W'_1(1-x) = (-C_1 - F)x + W'_1 \quad (2)$$

$$\bar{U}_1 = yU_1 + (1-y)U_2 \quad (3)$$

政府选择监管和不监管的期望收益以及平均收益分别为 $U_3, U_4, \bar{U}_2$:

$$U_3 = (W_2 - C_2 + Q)y + (W_2 - C_2 + F + S - L)(1-y) \quad (4)$$

$$U_4 = (W_2 + Q)y + (W_2 - G + S - L)(1-y) \quad (5)$$

$$\bar{U}_2 = xU_3 + (1-x)U_4 \quad (6)$$

分别对企业和政府 2 类群体进行复制动态分析,得到复制动态方程分别为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_1 - \bar{U}_1) = y(1-y) \cdot$$

$$(C_1x + Fx + W_1 - C_1 - W'_1) \quad (7)$$

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_3 - \bar{U}_2) = x(1-x) \cdot$$

$$[F + G - C_2 - (F + G)y] \quad (8)$$

复制动态方程反映了博弈方学习的速度和方向,当其为 0 时,表示此时博弈达到一种相对稳定的状态,选择企业的博弈动态进行分析。

当 $x = \frac{W'_1 + C_1 - W_1}{C_1 + F}$ 时, $F(y) = 0$, 即政府采取监管的概率为 $\frac{W'_1 + C_1 - W_1}{C_1 + F}$ 时,无论企业采取何种措施,博弈过程处于稳定状态(图 1(a))。

当 $x \neq \frac{W'_1 + C_1 - W_1}{C_1 + F}$ 时,令 $F(y) = 0, y = 0$ 或 $y = 1$ 为复制动态方程的 2 个稳定状态,对于监督或不监督 2 种策略,哪一种是政府的稳定性策略选择需要作进一步的讨论。对 $F(y)$ 求导得 $F'(y) = (1-2y)(C_1x + Fx - \Delta R - C_1)$, 且企业的治理成本 C_1 和企业选择不治理受到的罚款 F 是常数, $0 < \frac{W'_1 + C_1 - W_1}{C_1 + F} < 1$ 。当 $x < \frac{W'_1 + C_1 - W_1}{C_1 + F}$ 时, $F'(0) < 0, F'(1) > 0$, 故 $y = 0$ 是稳定策略(图 1(b)); 当 $x > \frac{W'_1 + C_1 - W_1}{C_1 + F}$ 时, $F'(0) > 0, F'(1) < 0$, 故 $y = 1$ 是稳定策略(图 1(c))。

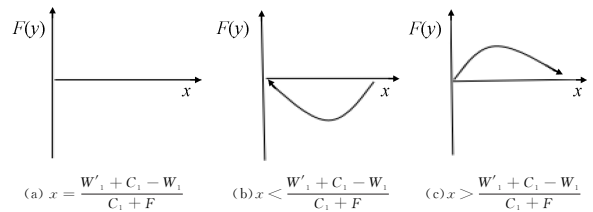


图 1 企业群体的复制动态相位

同理可得政府的复制动态相位图(图 2)。

为了更直观地表现政府和企业的复制动态方程,可用平面图形表述二者的关系(图 3)。

从图 3 可以看出,4 个顶点处无演化稳定策略,其状态是静态博弈均衡分析的结果。但在众多的企业和政府的博弈中,博弈不一定落在 4 个顶点处,

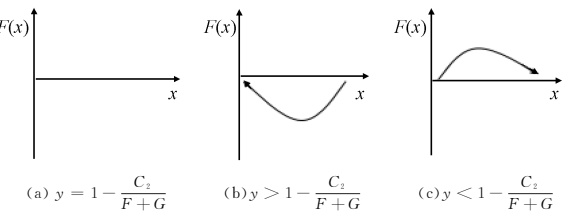


图2 政府群体的复制动态相位

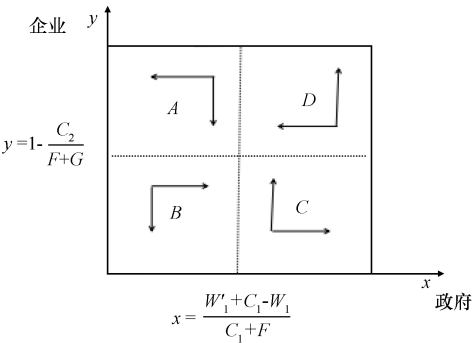


图3 政府和企业群体博弈的复制动态稳定性示意

将企业和政府的策略看成随机变量,其均匀地分布在方格中,其中 x 轴代表政府监管的概率, y 轴代表企业治理污染的概率。当初始状态落在区域 A 时,该博弈收敛于 $x=0,y=0$,即(不监管,非法排污)策略组合是政府和企业2个群体博弈的必然选择;当初始状态落在区域 B 时,该博弈收敛于 $x=1,y=0$,即(监管,非法排污)策略组合是政府和企业2个群体博弈的必然选择;当初始状态落在区域 D 时,该博弈收敛于 $x=0,y=1$,即(不监管,治理污染)策略组合是政府和企业2个群体博弈的必然选择;当初始状态落在区域 C 时,该博弈收敛于 $x=1,y=1$,即(监管,治理污染)策略组合是政府和企业2个群体博弈的必然选择。

通过该演化博弈模型,比较不同的均衡结果可知: $x = \frac{W'_1 + C_1 - W_1}{C_1 + F}$,令 $\Delta R = W'_1 - W_1$ 为企业选择不治理与治理的收益差额,则 $x = \frac{\Delta R + C_1}{C_1 + F}$,随着不治理收益差额 ΔR 减小或企业选择非法排污情况下的治理成本 C_1 减小以及罚款 F 增大, x 会逐渐变小;在 y 保持不变的情况下,区域 D 和 C 的面积逐渐扩大,使得博弈最终趋向(不监管,治理污

染)或(监管,治理污染)。 $y = 1 - \frac{C_2}{F+G}$,随着监管费用 C_2 减小或罚款 F 增大,以及社会公信力 G 损失增大, y 会逐渐变大;在 x 保持不变的情况下,区域 B 和 C 的面积会逐渐扩大,使得博弈最终趋向(监管,非法排污)或(监管,治理污染)。

2.3 解决博弈困境的启示

市场经济越发展,国民经济增长率越高,城市的工业污染越严重,环境保护和经济利益之间的冲突越激烈。企业的目标是追求利润的最大化,企业在治理措施、成本、排污数量方面掌握的信息比政府充分,在违法成本 F 较低的情况下,同样的资金投入 to 生产中可以增加利润 ΔR ,而投入到环境保护和治理中则没有显而易见的利润。在面临治污成本 C_1 和罚款成本 F 的选择时,由于罚款成本 F 具有比较优势,就会使企业不仅不积极治污,还会将罚款看做对非法排污的认可,因此出现屡禁屡排的现象。为逃避污染责任,一方面,企业会选择扭曲各方面信息来逃避处罚;另一方面,由于监管成本 C_2 过高,政府获得企业的全部治理和排放信息的困难重重,加上政府选择不监管时其公信力损失 G 过小,政府对企业的污染排放监管力度较小,这样会增加企业逃避环境责任的可能性,大多数企业就会选择直接将废水排放到水源地,从而导致水污染。影响 S_{C+D} 和 S_{B+C} 的参数与其均是单调关系,其对企业治理和政府监督的策略演化方向如表 2 所示。

表 2 参数的变化对企业和政府策略选择的影响		
参数变化	概率变化	相位面积变化与演化方向
$\Delta R \downarrow$	$X^* \downarrow$	$S_{C+D} \uparrow$
$C_1 \downarrow$	$X^* \downarrow$	$S_{C+D} \uparrow$
$F \uparrow$	$X^* \downarrow, Y^* \uparrow$	$S_{C+D} \uparrow, S_{B+C} \uparrow$
$G \uparrow$	$Y^* \uparrow$	$S_{B+C} \uparrow$
$C_2 \downarrow$	$Y^* \uparrow$	$S_{B+C} \uparrow$

根据表 2 可知,为了解决企业的非法排污问题,在 y 保持不变的情况下,使演化策略向“治理”方向演化,可以降低企业的治理成本 C_1 、增加罚款

力度 F 、增加治理后的收益 ΔR 。加强政府监管力度,在 x 保持不变的情况下,使演化策略向“监管”方向演化,可以降低政府的监管成本 C_2 、增加罚款力度 F 、增加社会公信力损失 G 。因此在现实中,巨大的治理成本和监管很难通过技术改变,而排污权交易机制可以减少企业治理陆源污染的成本和政府监管企业的排污成本,也能增加企业的收益。因此可以建立排污权交易机制以及加大对企业超排行为的处罚力度,引入公众参与政府监管的监督,从而减少企业污染物的排放。

3 沿海政府之间的博弈

东海沿岸地方政府都在治理陆源污染,但努力程度不尽相同,之间的协调与合作也不尽完美。由于海水具有一定的流动性,陆源污染入海的危害是相互影响的。沿岸地方政府在治理陆源污染方面作为博弈主体应采取“最优策略”,即不管对手采取何种策略,该策略对自己来说是最有利的策略,但该决策往往会造成不好的后果。

3.1 博弈假设

假设 1:有沿海地方政府 A 和 B 这 2 个群体,参与治理陆源污染的地方政府都是有限理性人,2 个群体进行策略交往。A 选择治理的概率为 x 、选择不治理的概率为 $(1-x)$,B 选择治理的概率为 y 、选择不治理的概率为 $(1-y)$ 。

假设 2:A 和 B 的环境治理成本分别为 C_A 和 C_B ,当 A 治理陆源污染时,就会减少陆源污染对海洋的排放,带给自己的收益为 Q_a ,从而增加海洋环境容量;由于水具有流动性,带给 B 的海洋环境正外部性为 $\beta\theta_a Q_a$,其中 β 为海洋环境质量在地方政府绩效考核中的权重系数, θ_a 为沿海政府 A 对沿海政府 B 的效应系数。当 A 不治理陆源污染时,就会增加陆源污染对海洋的排放,带给自己的损失为 L_a ,从而减少海洋环境容量;由于水具有流动性,带给 B 的海洋环境负外部性为 βL_a 。同理可得 B 的收益。当一方选择治理、另一方选择不治理时,受到中央政府的处罚为 F 。参数 C_A 、 C_B 、 Q_a 、 Q_b 、 θ_a 、 θ_b 、 F 、 β 、 L_a 、 L_b 均大于 0。

根据以上假设,博弈支付矩阵如表 3 所示。

表 3 沿海政府之间的博弈支付矩阵

沿海政府 A(x)	沿海政府 B(y)	
	治理	不治理
治理	$(-C_A+\beta(Q_a+\theta_bQ_b),$ $-C_B+\beta(Q_b+\theta_aQ_a))$	$(-C_A+\beta(Q_a-\theta_bL_b),$ $\beta(-L_b+\theta_aQ_a)-F)$
不治理	$(\beta(-L_a+\theta_bQ_b)-F,$ $-C_B+\beta(Q_b-\theta_aL_a))$	$(\beta(-L_a-\theta_bL_b),$ $\beta(-L_b-\theta_aL_a))$

3.2 演化博弈分析

根据表 3 计算出沿海政府 B 治理污染和不治理污染的期望收益以及平均收益分别为 U_1 、 U_2 、 $\overline{U_1}$:

$$U_1 = [-C_B + \beta(Q_b + \theta_a Q_a)]x + [-C_B + \beta(Q_b - \theta_a L_a)](1 - x) \tag{9}$$

$$U_2 = [\beta(-L_b + \theta_a Q_a) - F]x + \beta(-L_b - \theta_a L_a)(1 - x) \tag{10}$$

$$\overline{U_1} = yU_1 + (1 - y)U_2 \tag{11}$$

沿海政府 A 治理污染和不治理污染的期望收益以及平均收益分别为 U_3 、 U_4 、 $\overline{U_2}$:

$$U_3 = [-C_A + \beta(Q_a + \theta_b Q_b)]y + [-C_A + \beta(Q_a - \theta_b L_b)](1 - y) \tag{12}$$

$$U_4 = [\beta(-L_a + \theta_b Q_b) - F]y + \beta(-L_a - \theta_b L_b)(1 - y) \tag{13}$$

$$\overline{U_2} = xU_3 + (1 - x)U_4 \tag{14}$$

分别对 A 和 B 进行复制动态分析,得到的复制动态方程分别为:

$$F(x) = dx/dt = x(1-x)(-C_A + \beta Q_a + \beta L_a + yF) \tag{15}$$

$$F(y) = dy/dt = y(1-y)(-C_B + \beta Q_b + \beta L_b + xF) \tag{16}$$

令 $F(x) = 0$,得到 $x = 0, x = 1, x^* = (C_A - \beta Q_a - \beta L_a)/F$;

令 $F(y) = 0$,得到 $y = 0, y = 1, y^* = (C_B - \beta Q_b - \beta L_b)/F$ 。

与企业 and 政府间的演化博弈相同,这里不再对单个政府的策略进行稳定性分析,而是将沿海政府 A 和 B 相应的复制动态相位图表现在同一个坐标平面内,后述主体间的演化博弈同理。由 $F(x)$ 和 $F(y)$ 的稳定点可以得到 5 个局部均衡点分别是 $A(1,0)$ 、 B

$(1,1)$ 、 $C(0,1)$ 、 $D(x^*, y^*)$ 、 $O(0,0)$, 其中 $O(0,0)$ 和 $B(1,1)$ 是演化的稳定策略(图 4)。由图 4 可知, 当最初状态落在区域 $ABCD$ 时, 演化博弈系统向 $B(1,1)$ 收敛, 沿海地方政府都选择治理陆源污染唯一的演化稳定策略; 当最初状态落在区域 $AOCD$ 时, 演化博弈系统向 $O(0,0)$ 收敛, 沿海地方政府都选择不治理陆源污染唯一的演化稳定策略。

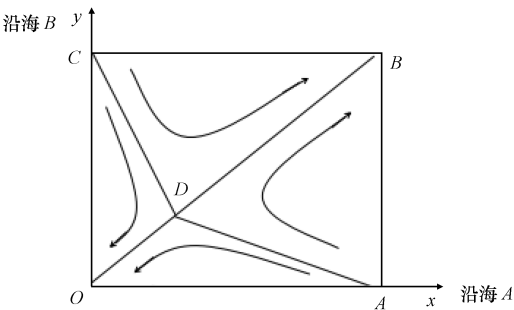


图 4 沿海地方政府之间演化的复制动态相位

3.3 解决博弈困境的启示

沿海地方政府面对高昂的陆源污染治理成本 C , 再加上对海域污染防治重视不够且 β 极小、中央政府的处罚 F 较轻, 往往容易忽略海洋生态环境, 从而使系统以更大的概率沿 DO 路径向(不治理, 不治理)策略演化, 最终导致海洋环境的破坏。为使系统以更大的概率沿 DB 路径向“帕累托最优”(治理, 治理)策略方向演化, 应使鞍点 D 的位置向 O 点靠近, 从而使区域 $ABCD$ 的面积扩大。由图 4 可知, $S_{ABCD} = 1 - (x^* + y^*)/2$, 影响 S_{ABCD} 的 8 个参数与 S_{ABCD} 均是单调关系, 其对沿海政府(治理, 治理)策略演化方向的影响如表 4 所示。

表 4 参数变化对沿海政府演化策略的影响

参数变化	鞍点变化	相位面积变化与演化方向
$C_A \downarrow$	$y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$C_B \downarrow$	$x^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$Q_a \uparrow$	$y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$Q_b \uparrow$	$x^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$L_a \uparrow$	$y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$L_b \uparrow$	$x^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$F \uparrow$	$x^* \downarrow, y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$\beta \uparrow$	$x^* \downarrow, y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)

根据表 4 可知, 要促进沿海政府对陆源污染的治理, 使演化策略向(治理, 治理)方向演化, 可以降低治理成本(C_A 、 C_B)、增加罚款力度 F 、增加海洋环境在地方政绩考核中的比重 β 。因此在现实中, 治理成本的巨大很难通过技术改变, 同时罚款力度的增加也难以控制企业的偷排行为, 而排污权交易机制可以降低政府治理陆源污染的成本, 从而减少政府治理的阻力; 完善政府政绩考评体系, 提高政府对环境污染的重视程度, 从而增加环境效益。

4 沿海政府与海岛政府之间的博弈

沿海城市选择废水排海的实质是污染转移, 但受海洋环境恶化影响最大的是相关海岛城市, 对其造成负的外部性。沿海城市考虑到巨大的治理成本以及海洋的公共性, 废水排海是最佳策略。海岛城市是污染的接受者, 一旦其进行治理, 由于环境治理具有正的外部性, 沿海城市就能坐享收益, 因此海岛城市在面临巨大的治理成本时一般会选择任其排放, 最终就会导致海洋环境继续恶化。

4.1 博弈假设

假设 1: 有沿海政府 A 和海岛政府 B 这 2 个群体, 参与治理陆源污染的沿海政府 A 和海岛政府 B 都是有限理性人, 2 个群体进行策略交往。沿海政府 A 选择治理的概率为 x 、选择不治理的概率为 $(1-x)$, 海岛政府 B 选择治理的概率为 y 、选择不治理的概率为 $(1-y)$ 。

假设 2: 沿海政府 A 和海岛政府 B 都选择治理陆源污染时的治理成本分别为 C_A 和 C_B , 产生的收益分别为 Q_a 和 Q_b , 由于海水是流动的, 环境治理具有正外部性, β 为海洋环境质量在地方政府绩效考核中的权重系数, θ_a 是沿海政府 A 对海岛政府 B 的效应系数, θ_b 是海岛政府 B 对沿海政府 A 的效应系数, 此时沿海政府因为陆源污染减少而获得的收益为 $\beta(Q_a + \theta_b Q_b)$, 海岛政府因为陆源污染减少而获得的收益为 $\beta(Q_b + \theta_a Q_a)$; 当海岛政府 B 选择不治理时, 沿海政府 A 选择治理所花费的成本为 C'_A , $C'_A > C_A$, 沿海政府因为陆源污染减少而获得的收益为 βQ_b , 海岛政府因为环境治理的正外部性而获得的收益为 $\beta(\theta_a Q_a)$; 当沿海政府 A 选择不治理时, 海岛政府 B 选择治理所花费的成本为 C'_B ,

$C'_B > C_B$, 海岛政府因为陆源污染减少而获得的收益为 βQ_b 。由于环境污染具有负外部性, 一旦沿海政府选择不治理, 产生的负效应为 L_a , 海岛城市就会因此减少收益 $\beta(\theta_a L_a)$ 。若构建双向生态补偿机制, 不治理一方向治理一方补偿 P 。且参数 C_A 、 C'_A 、 C_B 、 C'_B 、 β 、 Q_a 、 Q_b 、 L_a 、 θ_a 、 θ_b 、 P 均大于 0。

根据以上假设, 博弈支付矩阵如表 5 所示。

表 5 沿海政府与海岛政府之间的博弈支付矩阵

沿海政府 A(x)	海岛政府 B(y)	
	治理	不治理
治理	$(-C_A + \beta(Q_a + \theta_b Q_b),$ $-C_B + \beta(Q_b + \theta_a Q_a))$	$(-C'_A + \beta(Q_a) + P,$ $\beta(\theta_a Q_a) - P)$
不治理	$(\beta(-L_a + \theta_b Q_b) - P,$ $-C'_B + \beta(Q_b - \theta_a L_a) + P)$	$(\beta(-L_a), \beta(-\theta_a L_a))$

4.2 演化博弈分析

根据表 5 可知, 海岛政府 B 治理污染和不治理污染的期望收益以及平均收益分别为 U_1 、 U_2 、 $\overline{U_1}$:

$$U_1 = [-C_B + \beta(Q_b + \theta_a Q_a)]x + [-C'_B + \beta(Q_b - \theta_a L_a) + P](1-x) \quad (17)$$

$$U_2 = (\beta\theta_a Q_a - P)x + (-\beta\theta_a L_a)(1-x) \quad (18)$$

$$\overline{U_1} = yU_1 + (1-y)U_2 \quad (19)$$

沿海政府 A 治理污染和不治理污染的期望收益以及平均收益分别为 U_3 、 U_4 、 $\overline{U_2}$:

$$U_3 = [-C_A + \beta(Q_a + \theta_b Q_b)]y + (-C'_A + \beta Q_a + P)(1-y) \quad (20)$$

$$U_4 = [\beta(-L_a + \theta_b Q_b) - P]y + (-\beta L_a)(1-y) \quad (21)$$

$$\overline{U_2} = xU_3 + (1-x)U_4 \quad (22)$$

分别对海岛政府 B 和沿海政府 A 进行复制动态分析, 得到的复制动态方程分别为:

$$F(y) = dy/dt = y(1-y) \cdot [(C'_B - C_B)x - C'_B + \beta Q_b + P] \quad (23)$$

$$F(x) = dx/dt = x(1-x) \cdot [(C'_A - C_A)y + P - C'_A + \beta Q_a + \beta L_a] \quad (24)$$

令 $F(y) = 0$, 得到 $y = 0, y = 1, x^* = (C'_B - \beta Q_b - P)/(C'_B - C_B)$;

令 $F(x) = 0$, 得到 $x = 0, x = 1, y^* = (C'_A -$

$\beta Q_a - \beta L_a - P)/(C'_A - C_A)$ 。

由此得到 5 个均衡点, 分别是 $O(0,0)$ 、 $A(1,0)$ 、 $B(1,1)$ 、 $C(0,1)$ 、 $D(x^*, y^*)$ 。其中 $O(0,0)$ 和 $B(1,1)$ 是演化的稳定策略, 演化的复制动态相位图如图 5 所示。由图 5 可知, 当最初状态落在区域 ABCD 时, 演化博弈系统向 $B(1,1)$ 收敛, 最终沿海政府和海岛政府选择(治理, 治理)是唯一的演化稳定策略; 当最初状态落在区域 AOCD 时, 演化博弈系统向 $O(0,0)$ 收敛, 最终沿海政府和海岛政府选择(不治理, 不治理)是唯一的演化稳定策略。

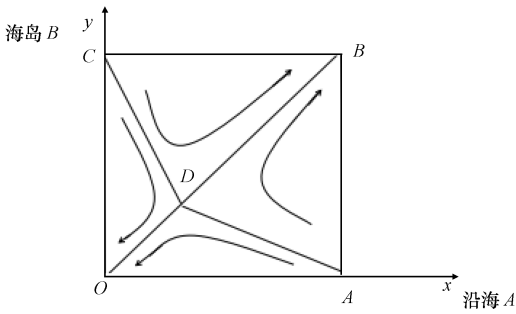


图 5 沿海政府与海岛政府群体之间演化的复制动态相位

4.3 解决博弈困境的启示

沿海城市是污染的源头, 海岛城市是污染的被动接受者, 在面对陆源治理高成本的情况下, C'_A 、 C_A 、 C'_B 和 C_B 很大, 而 βQ_b 、 βQ_a 、 βL_a 较小, 且海洋排污的生态补偿机制尚未建立, 从而使系统以更大的概率沿 DO 路径向(不治理, 不治理)策略演化, 最终导致海洋环境的破坏。为使系统以更大的概率沿 DB 路径向“帕累托最优”(治理, 治理)策略方向演化, 应使鞍点 D 的位置向 O 点靠近, 从而使区域 ABCD 的面积扩大。由图 5 可知, $S_{ABCD} = 1 - (x^* + y^*)/2$, 影响 S_{ABCD} 的 9 个参数与 S_{ABCD} 均是单调关系, 其对沿海政府和海岛政府策略演化方向如表 6 所示。

表 6 参数变化对沿海政府与海岛政府间演化博弈策略的影响

参数变化	鞍点变化	相位面积变化与演化方向
$C'_B \downarrow$	$x^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$C_B \downarrow$	$x^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$\beta \uparrow$	$x^* \downarrow, y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)

续表

参数变化	鞍点变化	相位面积变化与演化方向
$P \uparrow$	$x^* \downarrow, y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$Q_b \uparrow$	$x^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$C'_A \downarrow$	$y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$C_A \downarrow$	$y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$L_a \uparrow$	$y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)
$Q_a \uparrow$	$y^* \downarrow, D \downarrow$	$S_{ABCD} \uparrow$, (治理, 治理)

根据表 6 可知,要促进沿海政府和海岛政府对陆源污染进行治理,使演化策略向(治理,治理)方向演化,可以降低治理成本(C'_A 、 C_A 、 C'_B 、 C_B)、增加生态补偿额 P 、增加海洋环境在地方绩效考核中的比重 β 。因此在现实中,可构建排污权交易机制以减少政府治理陆源污染的成本,从而减少政府治理阻力;构建生态补偿机制以鼓励政府主动治理陆源污染,从而减少对海洋环境的破坏;完善政府政绩考评体系以增加政府对环境污染的重视程度,从而增加环境效益。

5 企业与公众之间的博弈

社会机制在很多发达国家被证明是有效的环境保护手段,实践证明政府、企业与社会公众共同保护环境是最可以持续的三位一体模式。目前在我国海洋环境保护的陆源污染治理中公众作用并没有很好地发挥,近年来随着海洋污染的加重,政府加大海洋环境保护宣传力度,使公众环保意识有一定的提高,但在大多数情况下公众只是被动参与、缺乏主动性。

污染企业和社会公众 2 个主体之间产生的博弈活动处于该博弈链条的最基础环节。企业面对的行为策略主要有 2 种类型:一种是在环保方面投入充分,虽然利润有一定程度的降低,但达到政府规定的排放标准,此时社会公众与污染企业将表现出良好关系、和平相处;另一种是在环保方面投入不是很充分,利润有所提高,但不能达到政府规定的排放标准,此时公众的健康等相关收益将因污染的负面影响而减少,公众会通过诉讼赔偿等方式来影响企业的污染行为。

5.1 博弈假设

假设 1:有企业和公众这 2 个群体,参与治理陆

源污染的企业和公众都是有限理性人,2 个群体进行策略交往。公众选择监督的概率为 x 、选择不监督的概率为 $(1-x)$,企业选择治理污染的概率为 y 、选择非法排放的概率为 $(1-y)$ 。

假设 2:企业在不治理污染时的收益为 W'_1 、治理污染时的收益为 W_1 ,且 $W'_1 > W_1$,治理污染的成本为 C_1 ,在公众监督的情况下,企业治理污染会获得公众认可带来的正效益 a_c ,不治理污染会获得公众不满带来的负效益 b_c 。公众在监督的情况下,企业治理污染时由于陆源污染物的减少给公众带来的效益为 q ,若企业选择非法排放,公众举报成本为 c ,此时能够获得奖励的收益为 r ,陆源污染给公众带来的负效益为 m ;在公众不监督的情况下,企业治理污染由于陆源污染物的减少给公众带来的效益为 q' , $q > q'$,企业非法排放带来的负效益为 m' , $m' > m$ 。且参数 W_1 、 W'_1 、 C_1 、 a_c 、 b_c 、 q 、 r 、 c 、 m 、 m' 均大于 0。

根据以上假设,博弈支付矩阵如表 7 所示。

表 7 公众与企业之间的博弈支付矩阵

企业(y)	公众(x)	
	监督	不监督
治理污染	$(W_1 - C_1 + a_c, q)$	$(W_1 - C_1, q')$
非法排污	$(W'_1 - b_c, r - c - m)$	$(W'_1, -m')$

5.2 演化博弈分析

根据表 7 计算出,企业治理污染和非法排污的期望收益以及平均收益分别为 U_1 、 U_2 、 $\overline{U_1}$:

$$U_1 = (W_1 - C_1 + a_c)x + (W_1 - C_1)(1 - x)$$
$$= a_c x + W_1 - C_1 \tag{25}$$

$$U_2 = (W'_1 - b_c)x + W'_1(1 - x)$$
$$= W'_1 + (-b_c)x \tag{26}$$

$$\overline{U_1} = yU_1 + (1 - y)U_2 \tag{27}$$

公众监督和不监督的期望收益以及平均收益分别为 U_3 、 U_4 、 $\overline{U_2}$:

$$U_3 = qy + (r - c - m)(1 - y) \tag{28}$$

$$U_4 = q'y - m'(1 - y) \tag{29}$$

$$\overline{U_2} = xU_3 + (1 - x)U_4 \tag{30}$$

分别对企业和公众 2 个群体博弈进行复制动态分析,得到复制动态方程分别为:

$$F(y)=\frac{dy}{dt}=y(U_1-\overline{U_1})=y(1-y)\cdot [(a_c+b_c)x+W_1-C_1-W'_1] \tag{31}$$
$$F(x)=\frac{dx}{dt}=x(U_1-\overline{U_1})=x(1-x)\cdot [(c-r+m-m'+q-q')y+r-c+m'-m] \tag{32}$$

令 $F(x)=0$, 得到 $x=0, x=1, y^*=(c-r+m-m')/(c-r+m-m'+q-q')$;
令 $F(y)=0$, 得到 $y=0, y=1, x^*=(W'_1+C_1-W_1)/(a_c+b_c)$ 。

由此得到 5 个局部均衡点, 分别是 $O(0,0)$ 、 $A(0,1)$ 、 $B(1,0)$ 、 $C(1,1)$ 、 $D(x^*,y^*)$, 其中 O 点和 C 点是演化的稳定策略, 分别代表(监督、治理污染)和(不监督、非法排污), 企业和公众间的博弈动态演化过程如图 6 所示。当初始状态落在区域 $ACBD$ 时, 演化博弈向 $C(1,1)$ 收敛, 最终(监督, 治理污染)是唯一的演化稳定策略; 当初始状态落在区域 $AOBD$ 时, 演化博弈向 $O(0,0)$ 收敛, 最终(不监督, 非法排污)是唯一的演化稳定策略。

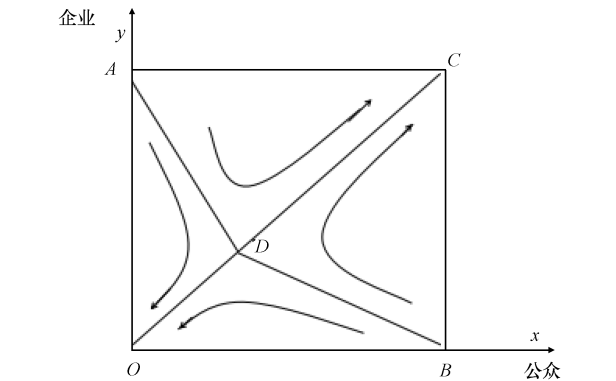


图 6 公众与企业群体之间演化的复制动态相位

5.3 解决博弈困境的启示

海洋环境的恶化仍没有引起公众对保护海洋环境的足够重视, 因此公众监督带来的收益增加量 Δm 、 Δq 很小, 此外公众投诉的成本 c 较大, 而政府对公众投诉行为的奖励 r 很小, $r < c$, 导致公众监督的积极性不高, 从而使系统以更大的概率沿 DO 路径向(不监督, 非法排污)策略演化。为使系统以更大的概率沿 DC 路径向“帕累托最优”(监督, 治理污染)策略方向演化, 应使鞍点 D 的位置向 O 点靠近,

从而使区域 $ADBC$ 的面积扩大。由图 6 可知, $S_{ADBC}=1-(x^*+y^*)/2$, 影响 S_{ADBC} 的 4 个参数与 S_{ADBC} 均是单调关系, 对公众和企业策略演化方向的影响如表 8 所示。

表 8 参数变化对企业和公众演化策略的影响		
参数变化	鞍点变化	相位面积变化与演化方向
$c \downarrow$	$x^* \downarrow$	$S_{ADBC} \uparrow$ (治理污染, 监督)
$r \uparrow$	$x^* \downarrow$	$S_{ADBC} \uparrow$ (治理污染, 监督)
$\Delta m \uparrow$	$x^* \downarrow$	$S_{ADBC} \uparrow$ (治理污染, 监督)
$\Delta q \uparrow$	$x^* \downarrow$	$S_{ADBC} \uparrow$ (治理污染, 监督)

根据表 8 可知, 要提高公众参与监督的积极性, 使演化策略向(治理污染, 监督)方向演化, 在企业选择治理的概率 y^* 保持不变的情况下, 可降低投诉成本 c 、增加投诉奖励 r 、增加公众对环保收益 Δm 和 Δq 的认识。

6 结论与建议

本研究采用演化博弈的方法, 分析政府与企业之间、沿海政府之间、沿海政府与海岛政府之间以及企业与公众之间在陆源污染治理问题上的行为选择和策略路径。对于企业而言, 选择是否治理的策略受治污成本、监管成本和治污收益的影响; 对于沿海政府和海岛政府而言, 选择是否治理的策略受治污成本、罚款额、地方政绩考核中的环境指标比重以及生态补偿额的影响; 对于公众而言, 选择是否监督的策略受投诉成本、投诉奖励和环保意识的影响。

为促进演化博弈向各主体合作的策略演进, 从而减少陆源污染及海洋污染, 建议如下:

(1)建立海洋排污权交易机制。在海洋污染物总量控制下, 对排污企业的排污权进行界定, 企业根据自身需要的排污量在市场上进行交易, 由于不同的企业在污染治理费用上有差异, 排污权交易可促使治污成本低的企业努力减少污染物排放, 从而将剩余的排污权出售。排污权交易使企业将污染纳入成本收益中, 治理成本较高的企业在排污量不足的情况下可以购买排污权, 从而减少治理成本。因此, 建立海洋排污权交易机制既可提高企业治理污染水平、减少治理成本, 也可以降低政府对海洋

环境的管理成本,充分发挥市场对排污权的配置作用,减少陆源污染物的排放。

(2)加大对企业超排行为的处罚力度。当前我国企业环境违法受到的处罚主要是罚款且额度较低,要使企业承担环境污染的责任,必须提高环境违法成本,如取消设定最高罚款额度,采取根据经济损失大小决定处罚多少这种灵活方式,提高处罚威慑力。同时,对企业环境违法的处罚不能仅用罚款的方式,对经济和社会造成严重危害的行为还需采取停产整顿、退出市场、刑事处罚等措施。

(3)建立海洋生态补偿机制。海洋生态补偿机制即海洋生态治理和保护的收益地区、收益者要为其获得的生态收益支付费用。可通过横向或纵向的财政支付方式,将海洋污染的治理成本在沿海政府与海岛政府间进行合理再分配。合理的生态补偿将会起到正面激励作用,对于主动治理和保护海洋环境的政府而言将会减少陆源污染物的排放,对于补偿的政府而言可以避免其非理性的行为。为达成各沿海地方政府的合作,应制定法律法规,就生态补偿主体的责任和义务、补偿水质标准、补偿方式等作出具体规定。

(4)完善政绩考核体系,提高奖惩力度。在地方政府的政绩考核体系中不仅要有 GDP 增长的经济指标,还要有环境质量指标,包括陆地和海洋的环境质量,并且提高环境质量指标在政府政绩考核体系中的比重,作为考核主要内容,实施问责制,做到陆源污染和海洋污染“一票否决制”;加大对不达标排放的处罚力度,同时加大对努力治污并取得成效的奖励力度。

(5)引入公众参与陆源污染防治。公众参与环境治理监督对企业排放行为有一定的约束作用,同时也可以通过公众的力量解决企业排污行为和政府监管信息不对称问题,从而降低政府监管成本。应大力宣传海洋环境保护,开通公众依法监督环保治理的渠道,依法给予公众环境知情权和参与权,加大对公众参与环境监督的奖励力度。

参考文献

- [1] 张林姣,沈满洪.东海陆源污染治理效率的实证研究:基于 DEA 三阶段模型分析[J].科技与经济,2016,29(3):90—94.
- [2] 李建勋,钟革资.陆源污染防治的全球性法律机制研究[J].环境与可持续发展,2010(3):4—7.
- [3] 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.
- [4] 徐大伟,涂少云,常亮,等.基于演化博弈的流域生态补偿利益冲突分析[J].中国人口·资源与环境,2012,22(2):8—14.
- [5] 张伟,周根贵,曹东.政府监管模式与企业污染排放演化博弈分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(11):108—113.
- [6] CHEUNG M, ZHUANG J. Regulation games between government and competing companies: oil spills and other disasters [J]. Decision Analysis, 2012, 9(2): 156—164.
- [7] 李铭,方创琳,石宇.区域管治中的博弈效应[J].中国人口·资源与环境,2008,18(2):1—7.
- [8] 余敏江,刘超.生态治理中地方与中央政府的“智猪博弈”及其破解[J].江苏社会科学,2011(2):147—152.
- [9] 刘洋,万玉秋.跨区域环境治理中地方政府间的博弈分析[J].环境保护科学,2010,36(1):34—36.
- [10] 张学刚,钟茂初.政府环境监管与企业污染的博弈分析及对策研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(2):31—35.
- [11] 杜建国,王敏,陈晓燕,等.公众参与下的企业环境行为演化研究[J].运筹与管理,2013,22(1):244—251.