

流域水污染治理模式的进化博弈模型

刘起方¹,马光文¹,刘群英²

(1. 四川大学水利水电学院,四川 成都 610065;2. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要 运用进化博弈理论,分析了流域治理中管理者和排污企业基于利益因素的动态博弈特征,并以淮河流域的治理情况进行了实际论证分析。结果表明,只有考虑基层政府的利益机制、适当的配套投入以及纳入政绩考核体系才能有效推动流域水污染治理。
关键词 流域;污染治理;进化博弈;稳定策略
中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2008)03-0069-04

Evolutionary game theory for water pollution control in river basins

LIU Qi-fang¹, MA Guang-wen¹, LIU Qun-ying²

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract The characteristics of the dynamic game between administrators and pollution discharge companies, each side acting in its self-interest in watershed management, are analyzed using the evolutionary game theory. A case study on the Huaihe River Basin shows that a mechanism taking the benefits of the local governments into consideration, an appropriate public subsidy system for the treatment of wastewater and a policy using the ecological loss as an index of government's achievement would help to improve water pollution control in river basins.
Key words river basin; pollution control; evolutionary game; stability strategy

随着经济的高速发展和工业化进程的不断加快,我国水污染态势日益严峻,以水资源紧缺和水污染严重为特征的水危机已成为制约经济发展、危害群众健康、影响社会稳定的重要因素。就流域污染而言,我国各大流域均存在不同程度的污染,尤其是淮河、辽河、海河、太湖、巢湖、滇池等流域的污染已达到触目惊心的程度。近年来国家不断加大对流域水污染防治的投入,虽然局部有所好转,但整体形势依然严峻:全国约 1/3 的水体丧失了直接使用功能,重点流域 40% 以上的水质没有达到治理要求,流经城市的河段普遍受到污染。针对我国流域治理模式及其成效情况,笔者从系统理论、动态角度出发,结合流域管理者(各级政府)、排污企业的利益机制因素,构建了动态博弈模型来分析流域管理者和排污企业的博弈情况,并分析了其动态进化过程。

1 进化博弈论

进化博弈理论的基本思想来自达尔文的生物进化论^[1-4],它的基本原则是适者生存。它突破了经典博弈论理性假设的局限,而以有限理性为基础来研究群体现象,认为群体中的个体并不是行为最优化者,个体的决策是个体之间模仿、学习和突变等动态过程来实现的。

因选择纯策略 s^i 的个体 $n_i(t)$ 在进化的动态过程中是时间的函数,其变化率不仅与其所在群体的大小有关,而且与自身所在群体的适应度有关。进化博弈系统的动态进化过程可用微分方程来表示

$$\begin{aligned} \frac{dn_i(t)}{dt} &= n_i(t)(s^i, \eta_i) \\ n_i(t) &= \eta_i N \end{aligned} \tag{1}$$

基金项目 国家自然科学基金(50539140)
作者简介 刘起方(1971—)男,重庆人,博士研究生,研究方向为水电经济管理。E-mail: lqf_678@tom.com

两边对 t 微分可得

$$dn_i(t)/dt = Nd\eta_i(t) + \eta_i \sum dn_i(t)/dt \quad (2)$$

联立式(1)(2)可得模拟者动态微分方程

$$d\eta_i(t)/dt = [f(s^i, \eta_i) - F(S, \eta)]\eta_i \quad (3)$$

$$S = \{s^1, s^2, s^3, \dots, s^k\}$$

$$\eta_i = n_i(t)/N$$

$$F(S, \eta) = \sum \eta_i f(s^i, \eta_i)$$

式中: N 为相互博弈的种群, 每个种群 n 有 K 个策略; S 为各个体可供选择的纯策略空间; $n_i(t)$ 为在时刻 t 选择纯策略 s^i 的个体数; η_i 为 $n_i(t)$ 在群体中所占的比例; $f(s^i, \eta_i)$ 为策略空间和选择该策略个体比例值的映射; $F(S, \eta)$ 为群体期望效用。

给定初始条件, 式(3)解对应的曲线描绘了所有种群的进化过程, 若解通过稳定性分析, 则该解对应于进化稳定策略(ESS), 文献[4]证明了“在多群体博弈中渐近稳定结果必是严格的纳什均衡”。

2 进化博弈模型

2.1 博弈问题

不失一般性, 设存在这样一个流域: 有 n 个排污企业, 用 $U_i | i = 1, 2, 3, \dots, n$ 表示; 如果治理, 每个企业的污染治理费为 C_i , 如果不治理, 每个企业排出的污染物导致的生态环境损失为 e_i , 每个企业在不治理情况下的利润和纳税分别为 π_i, θ_i ; 有一管理者或管理群体 G (政府相关机构或其他职能管理部门), 管理者将负责流域的监管和治理, 并采取两种管理模式(关停模式、罚款模式), 其中关停模式为刚性的惩罚模式, 罚款为柔性的惩罚模式。如果采用关停模式, 一旦企业不治理将被管理者强制关停; 如果采用罚款模式, 当企业不治理时, 将被罚款 α_i , 当企业治理时, 将奖励配套治理投入 β_i 。不失实际意义, 设 $C_i, e_i, \theta_i, \alpha_i$ 和 β_i 均大于零。

2.2 博弈模型构建

管理者有两种治理策略, 一是关停处理(s_G^1 策略), 二是罚款(s_G^2 策略); 排污企业也有两种策略, 一是不治理排污(s_U^1 策略), 二是治理达标排放(s_U^2 策略)。则流域污染治理博弈模型中管理者和排污企业的支付(效用)情况见表1。

表1 流域污染治理中管理者和排污企业的支付

策略	s_U^1	s_U^2
s_G^1	0, 0	$\theta_i, \pi_i - C_i$
s_G^2	$\theta_i + \alpha_i - e_i, \pi_i - \alpha_i$	$\theta_i - \beta_i, \pi_i - C_i + \beta_i$

设在排污企业群体中, 采用不治理的比例为 x ,

则采用治理的比例为 $1 - x$; 由于管理职能的公共性, 管理者采用治理措施的概率可以比拟为群体的演化, 设管理者对排污企业采用关停处理的比例为 y , 则采用罚款的比例为 $1 - y$ 。由于博弈各方的效用函数为策略空间和选择该策略值个体比例值的映射, 则排污企业采取不治理策略时的效用

$$f_U(s_U^1, \eta_i) = (1 - y)(\pi_i - \alpha_i) \quad (4)$$

当排污企业采用治理策略时的效用

$$f_U(s_U^2, \eta_i) = y(\pi_i - C_i) + (1 - y)(\pi_i - C_i + \beta_i) \quad (5)$$

则由式(4)(5)可得排污企业的期望效用

$$f_U(S, \eta) = xf_U(s_U^1, \eta_i) + (1 - x)f_U(s_U^2, \eta_i) \quad (6)$$

由此, 依据模拟者动态微分方程(3)可得

$$dx/dt = x(1 - x)(yR_1 + R_2) \quad (7)$$

$$dy/dt = y(1 - y)(xR_3 + \beta_i) \quad (8)$$

$$R_1 = \alpha_i + \beta_i - \pi_i$$

$$R_2 = C_i - \alpha_i - \beta_i$$

$$R_3 = e_i - \theta_i - \alpha_i - \beta_i$$

于是, 流域污染治理中管理者和排污企业的博弈过程转化为由式(7)(8)的动态微分方程来表示。

3 模型论证

分析动态微分方程(7)(8)可知, 其平衡点(奇点)的值只有当

$$dx/dt = 0 \text{ 和 } dy/dt = 0$$

时存在, 因而该博弈系统共有5个局部平衡点(依次命名为 $E_1 \sim E_5$, 且 $R_3 \neq 0, R_1 \neq 0$), 即:

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases} \begin{cases} x = 0 \\ y = 1 \end{cases} \begin{cases} x = 1 \\ y = 0 \end{cases} \begin{cases} x = 1 \\ y = 1 \end{cases} \begin{cases} x = -\beta_i/R_3 \\ y = -R_2/R_1 \end{cases}$$

平衡点的稳定性可由其雅克比矩阵的局部稳定性分析来取得^[4]。方程(7)(8)的雅可比矩阵为

$$J = \begin{vmatrix} (1 - 2x)(yR_1 + R_2) & x(1 - x)R_1 \\ y(1 - y)R_3 & (1 - 2y)(xR_3 + \beta_i) \end{vmatrix} \quad (9)$$

在平衡点处, 任意给定小量 $\sigma < 0$, 则存在扰动量为 $(\Delta x, \Delta y) < \sigma$ 的方程组:

$$\begin{pmatrix} dx/dt \\ dy/dt \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (10)$$

微分方程(10)与方程(7)(8)的相图在平衡态附近是拓扑等价的, 则由方程(10)可分析方程(7)(8)平衡点的稳定性。方程(10)的解为 $e^{\lambda t}$ 形态, 其中特征值 λ 为下方程的解。

$$\lambda^2 - J_{Tr}\lambda + J_{det} = 0 \quad (11)$$

式中: J_{Tr} 为矩阵 J 的迹, J_{det} 为矩阵 J 的行列式值。则由 λ 的解值可分析方程(7)(8)平衡点的稳定性。

3.1 平衡点的稳定性

a. E_1 点($x = 0, y = 0$) 此时 $J_{det} = R_2\beta_i, J_{Tr} = R_2 + \beta_i$ 。当 $R_2 > 0$ 时, $J_{det} > 0, J_{Tr} > 0$, 方程(11)有两个不相等的正实根, 此时 E_1 点为源点, 为不稳定点。当 $R_2 < 0$ 时, $J_{det} < 0$, 方程(11)有两个正、负不相等的实根, 此时 E_1 点为鞍点, 为不稳定点。当 $R_2 = 0$ 时, $J_{det} = 0, J_{Tr} > 0$, 方程(11)有一个零根、一个正实根, 方程(10)的解为 $x = a + be^{J_{Tr}t}, y = c + de^{J_{Tr}t}$ 形式, 均远离原定态解, 为不稳定点。

b. E_2 点($x = 0, y = 1$) 此时 $J_{det} = -\beta_i(C_i - \pi_i), J_{Tr} = C_i - \beta_i - \pi_i$ 。当 $(C_i - \pi_i) > 0$ 时, $J_{det} < 0$, 方程(11)有两个正、负不相等的实根, 此时 E_2 点为鞍点。当 $(C_i - \pi_i) \leq 0$ 时, $J_{det} \geq 0, J_{Tr} < 0$, 方程(11)有两个不相等的负根, 此时 E_2 点为汇点, 为 ESS 渐近稳定点。

c. E_3 点($x = 1, y = 0$) 此时 $J_{det} = -R_2(R_3 + \beta_i), J_{Tr} = R_3 + \beta_i - R_2$ 。当 $R_2 < 0, (R_3 + \beta_i) > 0$ 时, $J_{det} > 0, J_{Tr} > 0$, 方程(11)有两个不相等的正实根, 此时 E_3 点为源点。当 $R_2 > 0, (R_3 + \beta_i) < 0$ 时, $J_{det} > 0, J_{Tr} < 0$, 方程(11)有两个不相等的负根, 此时 E_3 点为汇点。当 $R_2 < 0, (R_3 + \beta_i) < 0$ 或 $R_2 > 0, (R_3 + \beta_i) > 0$ 时, $J_{det} < 0$, 方程(11)有两个正、负不相等的实根, 此时 E_3 点为鞍点。当 $R_2 = 0$ 或 $R_3 + \beta_i = 0$ 时, 系统分岔, 原博弈系统发生退化。

d. E_4 点($x = 1, y = 1$) 此时 $J_{det} = (C_i - \pi_i)(R_3 + \beta_i), J_{Tr} = \pi_i - C_i - R_3 - \beta_i$ 。当 $(C_i - \pi_i) < 0, (R_3 + \beta_i) < 0$ 时, $J_{det} > 0, J_{Tr} > 0$, 方程(11)有两个不相等的正实根, 此时 E_4 点为源点。当 $(C_i - \pi_i) > 0, (R_3 + \beta_i) > 0$ 时, $J_{det} > 0, J_{Tr} < 0$, 方程(11)有两个不相等的负根, 此时 E_4 点为汇点。当 $(C_i - \pi_i) < 0, (R_3 + \beta_i) > 0$ 或 $(C_i - \pi_i) > 0, (R_3 + \beta_i) < 0$ 时, $J_{det} < 0$, 此时 E_4 点为鞍点。当 $R_3 + \beta_i = 0$ 或 $C_i - \pi_i = 0$ 时, 系统分岔, 原博弈系统发生退化。

e. E_5 点($x = -\beta_i/R_3, y = -R_2/R_1$) 此时 $J_{det} = R_2\beta_i(\pi_i - C_i)(R_3 + \beta_i)(R_1R_3), J_{Tr} = 0$ 。当 $(R_3 + \beta_i) < 0$ (或 $R_3 > 0$) 且 $R_1 < 0$ (或 $R_1 + R_2 < 0$) 或 $0 < (R_1 + R_2) < R_1$ 或 $R_1 + R_2 < R_1 < 0$ 时, $J_{det} > 0, J_{Tr} = 0$, 方程(11)的解为纯虚数, 方程(10)的解为周期振荡型 $\cos(\text{Im}\lambda t)$, 此时 E_5 点为中心点, 中心点为稳定点但不渐近稳定, 不属于纳什均衡; 当 $(-\beta_i) < R_3 < 0$ 且 $R_1 < (R_1 + R_2) < 0$ (或 $0 < R_1 < (R_1 + R_2)$ 或 $(R_1 + R_2) < 0 < R_1$) 时, $J_{det} > 0, J_{Tr} = 0$, 此时 E_5 点为中心点; 当 $\pi_i = C_i$ 或 $R_2 = 0$ 或 $R_3 + \beta_i = 0$ 时, 系统分岔, 原博弈系统发生退化; 其余情况下, $J_{det} < 0$,

此时 E_5 点为鞍点。

3.2 系统的动态进化过程

3.2.1 不考虑配套投入的动态进化过程

流域水污染治理中管理者与排污企业进化博弈的动态过程如图 1 所示。图 1(a) 指当治理成本很高且不考虑生态损失时的动态博弈过程, 此时只有 E_3 点(企业不治理, 管理者采取罚款措施)为 ESS 点, 由于不考虑生态损失, 管理者的占优策略就是罚款, 同时由于治理费用很高, 排污企业的占优策略就是不治理, 由此形成了收费代替治理的局面, 管理者把罚款作为一种补充收入(或附加税源), 排污企业以缴纳罚款实质上获得了排污权。图 1(b) 指当治理成本很高且考虑生态损失时的动态博弈过程, 此时的 ESS 点为 E_4 点, 由于管理者必须考虑生态损失, 因此就不能单凭罚款了事, 同时因治理费用很高且没有配套投入, 排污企业治理起来将相当困难, 加上治理成本挤占利润空间使企业利润变薄甚至无利可图, 由此进化结果为企业不治理, 管理者采用关停措施。由图 1(a)(b) 对比分析可知, 虽然同为高治理成本情形, 但管理者是否考虑环境代价, 其最终的稳定策略是完全不同的。

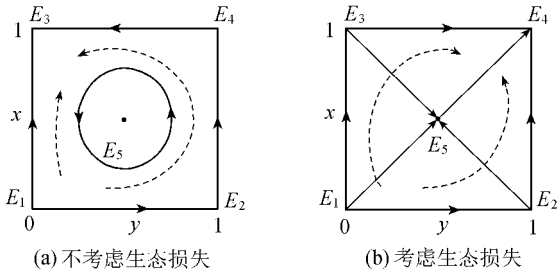


图 1 高治理成本时的进化博弈动态过程

同理, 图 2(a)(b) 指治理成本很低且在不考虑和考虑生态损失时的动态博弈过程, 由于治理成本很低, 企业在遭到任何处罚时的占优策略是采取治理措施, 在企业采取治理措施时管理者的罚款措施便失去价值, 由此形成了 E_2 点(企业治理, 管理者采取关停措施)的 ESS 稳定策略。虽然都形成了 E_2 点为 ESS 点, 但通过对比分析可知, 当不考虑生态损失时, E_3 点为鞍点, E_4 点为源点, E_5 点为中心点,

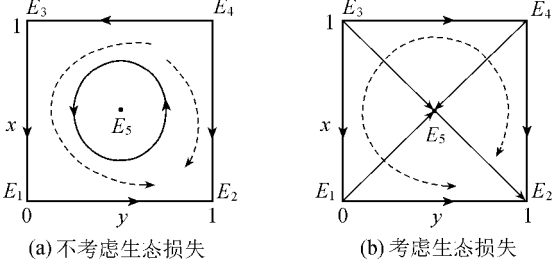


图 2 低治理成本时的进化博弈动态过程

而考虑生态损失时, E_3 为源点, E_4 、 E_5 为鞍点, 并导致了进化路径的差异: 当不考虑生态损失时, 由于治理成本很低, 企业一旦遭受处罚将采取治理策略, 如管理者采取关停措施时, 其博弈进化过程为 $E_4 \rightarrow E_2$, 如果管理者采取罚款措施, 其博弈进化过程为 $E_4 \rightarrow E_3 \rightarrow E_2$; 当考虑生态损失时, 一旦企业不治理时, 如管理者采用关停策略, 由于治理成本很低企业必然治理, 博弈进化的动态过程为 $E_3 \rightarrow E_1(E_5) \rightarrow E_2$, 如管理者采用罚款措施, 博弈进化的动态过程为 $E_3 \rightarrow E_1(E_5) \rightarrow E_2$ 。

另外, 由图 1(a)(b)、图 2(a)(b) 的对比分析可知: 当不考虑生态损失时, E_5 点为中心点, 此时进化博弈系统围绕中心点作周期运动, 即当企业不采取治理措施 $\rightarrow$ 管理者采取惩罚措施(由于不考虑生态损失, 管理者多采用罚款措施) $\rightarrow$ 企业采取治理措施 $\rightarrow$ 管理者取消惩罚 $\rightarrow$ 企业不治理, 如此周而复始形成“猫和老鼠”局面。当考虑生态损失时, E_5 点为鞍点, 当企业不采取治理措施时, 由于必须考虑生态损失, 管理者将采取惩罚措施(罚款甚至关停措施)来迫使企业治理, 因而博弈进化最终将趋于稳定的 ESS 点。

3.2.2 考虑配套投入的动态进化过程

当管理者对企业污染治理有配套投入时, 企业的污染治理成本由 C_i 转化为 $C_i - \beta_i$, 只要 β_i 适度可使企业治理成本由高成本转成低成本, 此时图 1(a)(b) 变为图 2(a)(b), 流域水污染治理博弈进化将形成唯一的 ESS 稳定策略(E_2 点), 此时企业的占优策略为采取治理措施。由此可见, 只要有适度配套投入, 将有助于流域的污染治理。

3.3 现实情况论证

从实际情况分析, 虽然国家已对流域污染治理进行了大量投入, 但治理效果仍不理想。就淮河而言^[5], 迄今经各种渠道投入的治理费用超过 600 亿元, 但目前的情况是 60% 的水为 V 类水, 丧失了水功能, 远未达到治理目标。在 2003 年以前, 淮河流域污染治理的重要措施之一就是采取行政手段关闭大量污染企业, 该措施在短期内虽然取得了一定成效, 但污染未得到根本治理。由于关闭的企业多属于“十五小”企业, 一般是乡镇等基层行政的主要财源, 同时农村税费改革以后, 农业税的下调, 收费项目的削减, 土地经营的限制, 进一步加剧了地方财政危机。由于上级政府关停企业采取行政手段, 一般不考虑给基层财政带来的损失, 为了解决“吃饭”问题, 基层政府往往与污染企业利益共谋, 合并“十五

小”为“十五大”, 重新挂牌生产, 结果是基层政府与上级政府玩“猫和老鼠”游戏, 污染依旧。2003 年, 我国实施排污收费政策, 希望通过收费抑制污染, 然而实际情况是, 排污企业通过缴纳排污费实质上获取了排污权, 地方政府把排污费作为一种附加税源, 治理结果可想而知。

另外, 从国内各流域的实际治理情况分析, 由于逐年造成的污染积重难返, 并没有出现低治理成本情况。由于流域内排污企业空间布局分散, 企业单独建造排污处理设施昂贵, 联合建设又因距离较远而使管网成本过高, 从而使治理成本高居不下, 加上国家投入的治理费用没有得到有效的利用和监管, 且基层地方政府的财政收入来源问题没有好的解决方案, 流域污染治理最终演变成“收费替代治理”(E_3 点) 局面。

4 结论及建议

①排污企业总有不治理污染物的倾向, 治理成本高时尤其明显; ②如果没有形成流域治理的长效机制, 将不会取得理想成效; ③流域治理的任何措施必须考虑基层政府的利益机制问题; ④只要有适度的配套投入或配套措施, 减少排污企业的治理成本, 就能从机制上使排污企业治理; ⑤把生态环境损失作为对各级政府的政绩考核指标, 将有力推动流域治理。

由此可见, 我国流域治理要达到治本目的, 必须要建立治理的长效机制, 通过财政转移支付来平衡基层政府的财政收入, 切断基层政府与排污企业的利益共谋, 变分散治理为集中治理, 大力推动循环经济的发展, 形成流域治理与地方经济发展的联动效应, 以实现流域的根本治理。

参考文献:

- [1] LEWONTIN R C. Evolution and the theory of games[J]. Journal of Theoretical Biology, 1960(1): 382-403.
- [2] MAYNARD S J, PRICE B R. The logic of animal conflict[J]. Nature, 1973, 246: 15-18.
- [3] TAYLOR P D, JONKER L B. Evolutionarily stable strategy and game dynamics[J]. Mathematical Bioscience, 1978, 40: 145-156.
- [4] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637-666.
- [5] 梁本凡. 淮河流域水污染治理与措施创新[J]. 水资源保护, 2006, 22(3): 84-87.

(收稿日期 2007-07-23 编辑 舒建)