

●环境污染治理研究(专题)

河流污染协同治理行为及相关福利分析

——基于不同经济空间结构的视角

徐志伟, 刘欢

(天津财经大学 商学院, 天津 300222)

摘要:运用演化博弈方法研究流域上下游地区在不同经济空间结构下,河流污染的跨区域治理行为及其对应的福利状况,并通过仿真技术对稳态均衡结果(ESS)进行了模拟。研究表明,虽然可能付出一定的制度成本,但无论处于何种经济空间结构,补偿机制必须与力度足够的惩罚机制相互配合,河流污染的协同治理才有可能成为稳态均衡。在惩罚机制缺失的条件下,地区间经济的互补性越强,上游地区经济越发达,机制失效造成的潜在福利损失越大。在补偿机制与惩罚机制并存的条件下,地区间经济的同质性越强,下游地区经济越发达,河流污染协同治理产生的福利改进空间就越大。

关键词:经济空间结构;河流污染;污染治理;协同治理;福利分析;演化博弈;跨界补偿;雅克比矩阵;稳态均衡

中图分类号:F062.2

文献标识码:A

文章编号:1007-2101(2015)04-0108-06

随着社会经济的快速发展,中国所面临的河流污染形势日益严峻,10大水系处于Ⅲ类以下水质的断面比例连续10年超过30%,海河、辽河、淮河和松花江4水系甚至常年超过50%,数量更多的中小河流污染情况更甚。河流污染治理工作涉及上下游多地区利益,任意单方的独立行动都无法从根本上解决问题,进行协同治理尤显必要。但在现实层面,实际的协同效果却差强人意。一方面,由于负外部性的存在,上游地区往往单纯为追求自身经济利益向河流任意排污,致使下游遭受损失。如近年发生的昆明东川小江变身“牛奶河”事件、漳河苯胺污染事件等,类似事件每年数以千计。另一方面,部分上游地区为保证下游地区用水安全,不得不以牺牲自身经济利益为代价,形成“水源地贫困”现象。如为保证首都地区用水安全,河北赤城县采取农业“退稻还旱”、工业限制发展措施保护水源,结果使其自身经济发展受限,至今仍为国家级贫困县。河流污染治理似乎陷入“上游地区谋发展,下游环境受污染”和“下游环境求改善,上游发展受局限”的两难困境。

在理论层面,对于上下游地区能否产生河流污染的协同治理行为仍存争议。部分学者认为,由于上游排污方可通过资源捕获和控制策略占据优势(Zeitouna, 2006)^[1],河流污染地区间的博弈主要是一种非合作的零和博弈(Bayramoglu, 2006; Wirl, 2008; 孙冬营, 2013)^{[2][3][4]},没有外力干预协同治理行为难以产生(Krawczyk, 2005; Mahjour, 2011)^{[5][6]}。但也有学者认为,追求“正和”的补偿机制能够改善上下游地区的福利水平(Fernandez, 2009; 赵来军, 2009)^{[7][8]},涉及多方利益的河流污染可通过协同治理有效解决(Schneider, 2013; 赖萍, 2013)^{[9][10]}。但

必须引入上级监督部门约束因子(李昌峰, 2014; 牛文娟, 2014)^{[11][12]},增强政策威胁的置信度(李胜, 2011)^[13],构建“举报惩罚”机制(曹洪华, 2013)^[14],通过保证上游地区收益最大化确定最优策略(徐大伟, 2013)^[15]。

但易于被忽略的问题是,河流是以水为纽带、由上下游组成的具有因果关联的复合系统(赵来军, 2009)^[8]。在这个复合系统中,经济空间结构作为区域经济各种空间形态在一定地域范围内的组合方式,影响着相关主体跨区域的经济行为与政策选择(郭腾云, 2009)^[16]。那么,在河流污染治理过程中,经济空间结构是否会影响上下游地区各自的行为选择模式及博弈的均衡结果? 什么样的治理机制才更易于产生河流污染协同治理行为? 经济空间结构及治理机制的差异性又会对上下游地区的福利水平产生何种影响? 对于上述种种问题,现有研究尚未给予清晰回答。本文将运用演化博弈方法对上述问题予以推演,并采用仿真技术对推演结果进行模拟。

一、研究设计

现有研究将跨界补偿视为化解污染外部性问题的有效机制。在补偿机制下,上下游地区同时面临着两种选择:上游地区既可选择削减产出控制污染,也可选择维持产出保持污染,进而形成(削减,不削减)两种策略;下游地区既可选择向上游地区支付补偿,也可选择不进行补偿维持现状,进而形成(补偿,不补偿)两种策略。在此策略空间下,分别从经济发展水平和经济同质性两方面,对上下游地区经济空间结构进行设定。

其一,现有研究往往认为跨界补偿的金额对不同地区是

收稿日期:2014-03-22

基金项目:国家社会科学基金青年项目“基于经济空间结构的河流污染跨区域协同治理研究”(14CGL032);天津财经大学2014年优秀青年学者资助计划

作者简介:徐志伟(1979-),男,天津人,天津财经大学商学院副教授,经济学博士,研究方向为资源、环境与区域经济发展。

等价的。实际上,对于不同的经济主体,单位货币的相对效用水平往往并不相等。一般而言,经济水平越是落后,单位货币的相对效用越高;反之,单位货币的相对效用越低。由此可设定,上游地区削减一单位产出所能获得补偿的相对效用为 R ,下游地区支付补偿的相对效用为 R' 。当 $R>R'$ 时,下游地区经济发达程度更高;当 $R<R'$ 时,上游地区经济发达程度更高;当 $R=R'$ 时,两地区经济水平相当。

其二,商品间的关系可用交叉价格弹性反映,并具体表现为弹性符号的差异性。假设上下游地区现各自仅生产一种产品,如果两地经济具有同质性,则其产品的交叉价格弹性为正,由此建立反需求函数 $p=a-bq_1-cq_2$ 。其中, q_1 为上游地区产品的产量, q_2 为下游地区产品的产量, $b>0$ 和 $c>0$ 均为参数。在不考虑生产成本情况下,上游地区的利润函数为 $\pi_1=(a-bq_1-cq_2)q_1$,削减一单位产出对其自身的利润影响为 $\frac{\partial \pi_1}{\partial q_1}=a-2bq_1-cq_2$ 。同理,下游地区的利润函数为 $\pi_2=(a-bq_1-cq_2)q_2$,上游地区削减一单位产出对下游地区的影响为 $\frac{\partial \pi_2}{\partial q_1}=-bq_2$ 。 $\frac{\partial \pi_2}{\partial q_1}<0$ 说明上游地区削减产出,下游地区的福利会增加。反之,如果两地经济具有互补性,则其产品的交叉价格弹性为负,上下游地区分别存在反需求函数 $p_1=a-bq_1+cq_2$ 、 $p_2=a+bq_1-cq_2$ 和利润函数 $\pi_1=(a-bq_1+cq_2)q_1$ 、 $\pi_2=(a+bq_1-cq_2)q_2$ 。上游地区削减一单位产出对其自身福利的影响分别为 $\frac{\partial \pi_1}{\partial q_1}=a-2bq_1+cq_2$,对下游地区的影响为 $\frac{\partial \pi_2}{\partial q_1}=bq_2$ 。其中, $\frac{\partial \pi_2}{\partial q_1}>0$ 说明上游地区削减产出,下游地区的福利会受损。

综上,可得到上下游地区经济分处同质和互补两种状态下的支付矩阵,具体如表1和表2所示。

表1 经济具有同质性的支付矩阵

| 上游地区 | 下游地区 | |
|------|---|--|
| | 补偿 | 不补偿 |
| 削减 | $R+\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)$ $\varphi_2(-bq_2)-R'$ | $\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)$ $\varphi_2(-bq_2)$ |
| 不削减 | R $-R'$ | 0 0 |

表2 经济具有互补性的支付矩阵

| 上游地区 | 下游地区 | |
|------|---|--|
| | 补偿 | 不补偿 |
| 削减 | $R+\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1+cq_2)$ φ_2-bq_2-R' | $\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1+cq_2)$ φ_2-bq_2 |
| 不削减 | R $-R'$ | 0 0 |

其中,除已定义变量外, φ_1 和 φ_2 分别表示上游地区削减一单位产出对其自身和下游地区环境改善产生的积极影响, μ_1 为上游地区削减一单位产出付出的技术成本,如生产设备拆除费用等。

二、仅存补偿机制时的演化博弈分析

(一)经济具有同质性的演化博弈分析

首先分析经济具有同质性时,上下游地区能否仅仅依靠

补偿机制产生河流污染协同治理行为。假设上下游地区随机的选择自身策略,并展开重复博弈。上游地区选择削减产出的概率为 x ,不削减产出的概率为 $(1-x)$;下游地区选择补偿的概率为 y ,不进行补偿的概率为 $(1-y)$ 。

根据表1所示的支付矩阵,当上下游地区经济处于同质性状态时,上游地区选择不同策略的适应度分别为 $U_{11}=y[R+\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)]+(1-y)[\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)]$ 和 $U_{12}=yR+(1-y)0$,平均适应度为 $U_1=xU_{11}+(1-x)U_{12}$ 。由此,上游地区的复制动态方程及一阶导数分别为 $F(x)=\frac{dx}{dt}=x(1-x)[\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)]$ 和 $F(x)'=(1-2x)[\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)]$ 。令 $F(x)=0$,解得 $x^*=0$ 和 $x^*=1$ 是其中两个可能的稳定点。按照常理,如果不能获得经济补偿,上游地区不会主动削减产出,由此推断一般存在 $[\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)]<0$ 。因此,对于上游地区复制动态方程的一阶导数存在 $F(1)'\geq 0$ 和 $F(0)'\leq 0$ 。因此 $x^*=0$,即上游地区不削减产出是稳定状态点。同理,下游地区选择不同策略的适应度为 $U_{21}=x(\varphi_2+bq_2-R')+(1-x)(-R')$ 和 $U_{22}=x(\varphi_2+bq_2)+(1-x)0$,平均适应度为 $U_2=yU_{21}+(1-y)U_{22}$ 。由此推知,下游地区的复制动态方程及一阶导数分别为 $F(y)=\frac{dy}{dt}=y(1-y)(-R')$ 和 $F(y)'=(1-2y)(-R')$ 。令 $F(y)=0$,解得 $y^*=0$ 和 $y^*=1$ 是其中两个可能的稳定点。由于 $R'\geq 0$,下游地区复制动态方程的一阶导数存在 $F(1)'\geq 0$ 和 $F(0)'\leq 0$ 。因此, $y^*=0$,即下游地区不进行经济补偿是稳定状态点。

根据Friedman的方法,通过雅克比矩阵分析平衡点的稳定性。此时的雅克比矩阵为:

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} (1-2x)[\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)] & 0 \\ 0 & (1-2y)(-R') \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据(1)式,对应的行列式为 $\det J=(1-2x)(1-2y)[\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)](-R')$,对应的迹为 $\text{tr } J=(1-2x)[\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)]+(1-2y)(-R')$ 。按照常理,在上游地区接受补偿之前存在 $\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)<0$,接受补偿之后存在 $R+\varphi_1-\mu_1-(a-2bq_1-cq_2)\geq 0$,可知当 $R'\geq R$,即上游地区经济发达程度不低于下游地区时,雅克比矩阵行列式和迹的符号分别为: $(0,0)$ 处 $(+,-)$, $(0,1)$ 处 $(-,+)$, $(1,0)$ 处 $(-, -)$, $(1,1)$ 处 $(+, +)$ 。因此 $(0,0)$ 点,即“上游地区不削减产出,下游地区不进行补偿”为稳态均衡。当 $R>R'$,即下游地区经济发达程度高于上游地区时,雅克比矩阵行列式和迹的符号分别为: $(0,0)$ 处 $(+,-)$, $(0,1)$ 处 $(-, \text{不确定})$, $(1,0)$ 处 $(-, \text{不确定})$, $(1,1)$ 处 $(+, +)$ 。因此 $(0,0)$ 点,“上游地区不削减产出,下游地区不进行补偿”仍为稳态均衡。因此,当上下游地区经济具有同质性时,仅依靠补偿机制无法达成河流污染的协同治理状态,且上述结论的成立与上下游地区经济发展水平无关。

(二)经济具有互补性的演化博弈分析

当经济具有互补性时,上游地区削减一单位产出对其自

身的影响为 $\frac{\partial \pi_1}{\partial q_1} = a - 2bq_1 + cq_2$, 对下游地区的影响为 $\frac{\partial \pi_2}{\partial q_1} = bq_2$ 。通过计算上下游地区博弈过程中的适应度、复制动态方程及其一阶导数, 可得到 $x^*=0$ 和 $y^*=0$ 是两个稳定状态点。雅克比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2x)[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1+cq_2)] & 0 \\ 0 & (1-2y)(-R') \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过对(2)式行列式和迹的计算, 可得到 $\det J = (1-2x)(1-2y)[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1+cq_2)](-R')$ 和 $\text{tr} J = (1-2x)[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1+cq_2)] + (1-2y)(-R')$ 。与同质状态相比较, 经济处于互补状态时必然存在 $[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1+cq_2)] < [\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2)] < 0$ 。因此, 可得到 $R \geq R'$ 和 $R < R'$ 时, 雅克比矩阵行列式和迹的符号: (0,0)处(+,-), (0,1)处(-,+或不确定), (1,0)处(-,-或不确定), (1,1)处(+,+)。此时的(0,0)点, “上游地区不削减产出, 下游地区不进行补偿”依然是稳态均衡, 河流污染治理的协同状态仍无法达成。

综上, 可得到命题 1: 河流污染治理过程中, 无论上下游地区处于何种经济空间结构, 仅仅依靠补偿机制都无法实现河流污染的协同治理。

(三) 福利水平的比较

根据相关支付矩阵和稳定性分析结果, 当上下游地区经济具有同质性时, 作为稳定状态(不削减, 不补偿)的总福利水平为 $\Pi_{0,0}=0$ 。与之对应, 理想的协同状态(削减, 补偿)总福利水平为 $\Pi_{1,1} = \Gamma - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2-bq_2) + \Delta R$ 。其中, $\Gamma = \varphi_1 + \varphi_2$, $\Delta R = R - R'$ 。协同治理未能实现的潜在福利损失为 $\Delta \Pi = \Pi_{0,0} - \Pi_{1,1} = \mu_1 + (a-2bq_1-cq_2-bq_2) - \Gamma - \Delta R$ 。

上下游地区经济具有互补性时, 作为稳定状态(不削减, 不补偿)的总福利水平仍为 $\Pi'_{0,0}=0$, 理想的协同状态(削减, 补偿)总福利水平为 $\Pi'_{1,1} = \Gamma - \mu_1 - (a-2bq_1+cq_2+bq_2) + \Delta R$, 潜在的福利损失为 $\Delta \Pi' = \Pi'_{0,0} - \Pi'_{1,1} = \mu_1 + (a-2bq_1+cq_2+bq_2) - \Gamma - \Delta R$ 。对于经济处于同质和互补两种状态的福利损失进行比较可以发现, 存在 $\Delta \Pi' - \Delta \Pi = 2(b+c)q_2 > 0$ 。因此, 上下游地区经济处于互补状态时, 由于机制失效造成的潜在福利损失更大。同时, 如果 $\Delta R > 0$, 则存在 $\frac{\partial \Delta \Pi}{\partial \Delta R} < 0$ 和 $\frac{\partial \Delta \Pi'}{\partial \Delta R} < 0$; 如果 $\Delta R < 0$, 则

$$\frac{\partial \Delta \Pi}{\partial \Delta R} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \Delta \Pi'}{\partial \Delta R} > 0。因此, 与下游地区相比较, 上游地区经济越发达, 潜在的福利损失就越大。$$

综上, 可得到命题 2: 虽然经济空间结构不会影响上下游地区在河流污染治理过程中的稳态均衡结果, 但却会影响福利水平。地区间经济的互补性越强, 由于机制失效造成的潜在损失越大; 地区间经济的同质性越强, 由于机制失效造成的潜在损失越小。同时, 上游地区经济越发达, 由于机制失效造成的潜在损失越大; 下游地区经济越发达, 由于机制失效造成的潜在损失越小。

三、引入惩罚机制的演化博弈分析

上文研究发现, 仅仅依靠补偿机制上下游地区间不会产生稳定的河流污染的协同治理行为。现假设能够引入惩罚机制, 通过诉讼方式对“上游削减产出, 下游不进行补偿”和“下游进行补偿, 上游不削减产出”两种机会主义行为进行惩戒约束。此时, 可得到上下游地区经济分处同质和互补两种状态下的支付矩阵, 具体如表 3 和表 4 所示。

表 3 引入惩罚机制后经济具有同质性的支付矩阵

| 上游地区 | 下游地区 | |
|------|---|---|
| | 补偿 | 不补偿 |
| 削减 | $R + \varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2)$ $\varphi_2 - (bq_2) - R'$ | $\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2) + p\gamma - \varepsilon$ $\varphi_2 - (bq_2) - p\gamma'$ |
| 不削减 | $R - p\gamma$ $-R' + p\gamma' - \varepsilon'$ | 0 0 |

表 4 引入惩罚机制后经济具有互补性的支付矩阵

| 上游地区 | 下游地区 | |
|------|---|---|
| | 补偿 | 不补偿 |
| 削减 | $R + \varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1+cq_2)$ $\varphi_2 - bq_2 - R'$ | $\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1+cq_2) + p\gamma - \varepsilon$ $\varphi_2 - bq_2 - p\gamma'$ |
| 不削减 | $R - p\gamma$ $-R' + p\gamma' - \varepsilon'$ | 0 0 |

其中, γ 或 γ' 为惩罚机制下采取机会主义行为的一方支付给另一方的违约金。与 R 和 R' 对应的经济含义类似, 如果 $\gamma > \gamma'$, 下游地区经济发达程度更高; 如果 $\gamma < \gamma'$, 上游地区经济发达程度更高; 如果 $\gamma = \gamma'$, 两地区经济水平相当。 ε 或 ε' 为因获取证据、搜集信息等而发生的制度成本, p 为诉讼成功的概率。

(一) 经济具有同质性的演化博弈分析

根据表 3 所示的支付矩阵, 引入惩罚机制之后上游地区选择不同策略的适应度分别为 $U_{11} = \gamma[R + \varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2)] + (1-\gamma)[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2) + p\gamma - \varepsilon]$ 和 $U_{12} = \gamma(R - p\gamma) + (1-\gamma)0$, 平均适应度为 $\bar{U}_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12}$ 。此时, 上游地区演化博弈的复制动态方程及一阶导数分别为 $F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2) + p\gamma - \varepsilon + \gamma\varepsilon]$ 和 $F(x)' = (1-2x)[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2) + p\gamma - \varepsilon + \gamma\varepsilon]$ 。令 $F(x) = 0$, 解得 $x^*=0$, $x^*=1$ 和 $y^* = \frac{\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1-cq_2) + p\gamma - \varepsilon}{\varepsilon}$ 是三个可能的稳定点。其中,

当 $y = y^*$ 时, 所有 x 都是稳定的; 当 $y > y^*$ 时, $x^*=1$, 即上游地区削减产出水平是稳定状态点; 当 $y < y^*$ 时, $x^*=0$, 即上游地区维持现有产出水平是稳定状态点。

同理, 可得到下游地区选择不同策略的适应度 $U_{21} = x(\varphi_2 + bq_2 - R') + (1-x)(-R' + p\gamma' - \varepsilon')$ 和 $U_{22} = x(\varphi_2 + bq_2 - p\gamma') + (1-x)0$, 对应的平均适应度为 $\bar{U}_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22}$ 。此时的复制动态方程及一阶导数分别为 $F(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)(-R' + p\gamma' - \varepsilon' + x\varepsilon')$ 和 $F(y)' = (1-2y)(-R' + p\gamma' - \varepsilon' + x\varepsilon')$ 。令 $F(y) = 0$, 解得 $y^*=0$, $y^*=1$ 和 $x^* = \frac{-R' + p\gamma' - \varepsilon'}{\varepsilon}$ 是三个可能的稳定点。当 $x = x^*$ 时, 所有 y

都是稳定的;当 $x > x^*$ 时, $y^* = 1$, 即下游地区对上游进行经济补偿是稳定状态点;当 $x < x^*$ 时, $y^* = 0$ 时, 即下游地区不进行经济补偿是稳定状态点。

在此基础上, 得到雅克比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2x)[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1 - cq_2) + p\gamma - \varepsilon + y\varepsilon] & x(1-x)\varepsilon \\ y(1-y)\varepsilon' & (1-2y)(-R' + p\gamma' - \varepsilon' + x\varepsilon') \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过(3)式可以发现, 如果惩戒力度大到足以弥补因对方采取机会主义行为而造成的经济损失, 即存在 $p\gamma - \varepsilon > -[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1 - cq_2)]$ 和 $p\gamma' - \varepsilon' > R'$ 时, 雅克比矩阵行列式和迹的符号为: (0,0)处(+,+), (0,1)处(-,不确定), (1,0)处(-,不确定), (1,1)处(+,-), $E(x_0, y_0)$ 处(-,0)。因此(1,1)点, 即“上游地区削减产出, 下游地区进行补偿”为稳态均衡, 上下游地区之间产生河流污染协同治理行为。反之, 当对机会主义行为惩戒不足时, 即存在 $p\gamma - \varepsilon < -[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1 - cq_2)]$ 和 $p\gamma' - \varepsilon' < R'$, 雅克比矩阵行列式和迹的符号为: (0,0)处(+,-), (0,1)处(-,不确定), (1,0)处(-,不确定), (1,1)处(+,+), $E(x_0, y_0)$ 处(+,0)。因此(0,0)点, 即“上游地区不削减产出, 下游地区不进行补偿”为稳态均衡, 上下游地区之间就不会产生河流污染协同治理行为。

(二)经济具有互补性的演化博弈分析

依据表4, 当上下游地区经济具有互补性时, 分别通过计算适应度、复制动态方程及一阶导数, 可得到以下结果:

对于上游地区, $x^* = 0, x^* = 1$ 和 $y^* = -\frac{\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1 + cq_2) + p\gamma - \varepsilon}{\varepsilon}$

是三个可能的稳定点。当 $y = y^*$ 时, 所有 x 都是稳定的; 当 $y > y^*$ 时, $x^* = 1$, 即上游地区削减产出水平是稳定状态点; 当 $y < y^*$ 时, $x^* = 0$, 即上游地区维持现有产出是稳定状态点。同理, 对于下游地区, $y^* = 0, y^* = 1$ 和 $x^* = -\frac{-R' + p\gamma' - \varepsilon'}{\varepsilon}$ 是其中的稳定点。当 $x = x^*$ 时, 所有 y 都是稳定的; 当 $x > x^*$ 时, $y^* = 1$, 即下游地区对上游进行经济补偿是稳定状态点; 当 $x < x^*$ 时, $y^* = 0$, 即下游地区不进行经济补偿是稳定状态点。

通过对雅克比矩阵及其行列式和迹进行对比可以发现, 当对机会主义行为进行严格惩戒, 即存在 $p\gamma - \varepsilon > -[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1 + cq_2)]$ 和 $p\gamma' - \varepsilon' > R'$ 时, (1,1)点, 即“上游地区削减产出, 下游地区进行补偿”为稳态均衡。反之, 如果惩戒力度不足以弥补对方机会主义行为造成的经济损失, 即存在 $p\gamma - \varepsilon < -[\varphi_1 - \mu_1 - (a-2bq_1 + cq_2)]$ 和 $p\gamma' - \varepsilon' < R'$ 时, (0,0)点, 即“上游地区不削减产出, 下游地区不进行补偿”为稳态均衡。因此, 当上下游地区经济处于互补状态时, 只要惩戒力度足够大, 河流污染协同治理行为仍然会稳定存在。

综上, 可得到命题3: 无论上下游地区间处于何种经济空间结构, 只有当惩戒力度大到足以弥补因对方采取机会主义行为而造成的经济损失时, 补偿机制与惩罚机制之间的相互配合才能实现河流污染的协同治理。

(三)福利水平的比较

根据相关支付矩阵和稳定性分析结果, 上下游地区经济具有同质性时, 作为稳定状态(削减, 补偿)的总福利水平为 $\Pi''_{1,1} = \Gamma - \mu_1 - (a-2bq_1 - cq_2 - bq_2) + \Delta R - \varepsilon$ 。相较于仅存在补偿机制时(削减, 补偿)的福利水平 $\Pi_{1,1} = \Gamma - \mu_1 - (a-2bq_1 - cq_2 - bq_2) + \Delta R$, 福利损失为 ε 。 ε 为达成协同治理所必须付出的制度成本。同理, 上下游地区经济具有互补性时, 作为稳定状态(削减, 补偿)的总福利水平为 $\Pi'''_{1,1} = \Gamma - \mu_1 - (a-2bq_1 + cq_2 + bq_2) + \Delta R - \varepsilon$ 。与仅存在补偿机制时(削减, 补偿)的福利水平 $\Pi'_{1,1} = \Gamma - \mu_1 - (a-2bq_1 + cq_2 + bq_2) + \Delta R$ 相比较, 福利损失仍为制度成本 ε 。

由此, 可得到命题4: 无论上下游地区处于何种经济空间结构, 河流污染协同治理的达成必须辅之以一定的制度成本, 其是实现协同状态所必须承担的福利损耗。

同时, 由于存在 $\Pi'''_{1,1} - \Pi'_{1,1} = -2(b+c)q_2 < 0$, 在上下游地区经济处于同质状态时, 协同治理产生的福利改进相对明显。此外, 如果 $\Delta R > 0$, 则存在 $\frac{\partial \Delta \Pi''}{\partial \Delta R} > 0$ 和 $\frac{\partial \Delta \Pi'''}{\partial \Delta R} > 0$; 如果

$\Delta R < 0$, 则 $\frac{\partial \Delta \Pi''}{\partial \Delta R} < 0$ 和 $\frac{\partial \Delta \Pi'''}{\partial \Delta R} < 0$ 。因此, 与上游地区相比较, 下游地区经济越发达, 福利改进就越明显。

由此, 可得到命题5: 地区间经济的同质性越强, 河流污染协同治理产生的福利改进程度越高; 地区间经济的互补性越强, 河流污染协同治理产生的福利改进程度越低。同时, 下游地区经济越发达, 河流污染协同治理产生的福利改进程度越高; 上游地区经济越发达, 河流污染协同治理产生的福利改进程度越低。

四、数值仿真

上文对河流上下游地区的经济空间结构与水污染协同治理行为关系进行了理论推演, 并对其产生的福利状况进行了对比分析。现运用仿真技术对理论推演结果进行进一步模拟验证。假设流域上下游现各有50个参与人进行水污染治理博弈, 且所有参与人的初始状态都选择不合作, 即上游的参与人继续排污, 下游的参与人不支付补偿。考虑到河流存在自净能力, 上游地区变动一单位产出对其自身环境质量的影响要大于对下游地区的影响, 因此一般存在 $\varphi_1 > \varphi_2$ 。由此设定 $\varphi_1 = 500, \varphi_2 = 400$ 。同时, 设定上游地区减少一单位产出的技术成本 $\mu = 450$, 参数 $a = 100, b = 0.5, c = 0.2$, 产出水平 $q_1 = 10, q_2 = 20$ 。一般情况下, 下游参与人进行跨界补偿的金额必须要超过上游参与人削减产出所产生的损失协同治理行为才可能产生, 因此设定跨界补偿金额 $R = 40$ 。最后, 假设存在一个较小的制度成本 $\varepsilon = 1$ 。

在经济具有同质性时, 上游地区参与人选择不合作行为对应的收益为 $yR + (1-y)0 = yR$, 面临的惩戒损失为 $yp\gamma$ 。只要存在 $yp\gamma > yR$, 上游地区参与人就会改变行为选择合作, 通过削减产出控制排污。同理, 下游地区参与人分别存在选择不合作行为的收益 $x(\varphi_2 + bq_2) + (1-x)0 = x(\varphi_2 + bq_2)$ 和损失 $yp\alpha\gamma$ 。其中, α 为调整系数。当 $\alpha > 1$ 时, $\gamma < \gamma'$, 意味着上游地区经济

发达程度更高;当 $\alpha < 1$ 时, $\gamma > \gamma'$,意味着下游地区经济发达程度更高;当 $\alpha = 1$ 时, $\gamma = \gamma'$,意味着两地区经济发达程度相当。同理,只要存在 $y p \alpha \gamma > x(\varphi_2 + b q_2)$,下游地区参与人就会改变行为选择合作,通过向上游地区支付补偿改善环境质量。

如果上下游地区间经济存在同质性,分别设定一个较小的惩戒力度 $\gamma = 4$ 和一个较大的惩戒力度 $\gamma = 20$,同时设定调整系数 $\alpha = 2$,即上游地区经济发达程度更高,利用 Netlogo 软件得到的仿真结果如图 1 所示。经过 2000 次博弈后,当 $\gamma = 4$ 时,约有 51.2%的参与人会选择合作;当 $\gamma = 20$,约有 76.3%的参与人会选择合作。在其他条件不变的情况下,如果上下游地区经济具有互补性,则如图 2 所示,当 $\gamma = 4$ 时,约有 48.7%的参与人会选择合作;当 $\gamma = 20$,约有 73.1%的参与人会选择合作。

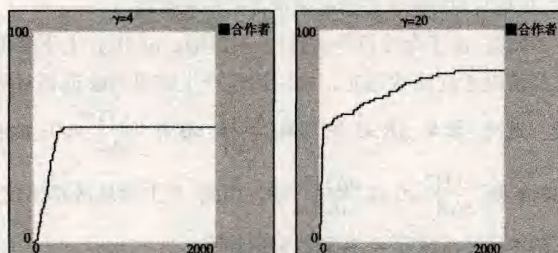


图 1 经济具有同质性且上游地区经济发达程度更高状态下的仿真结果

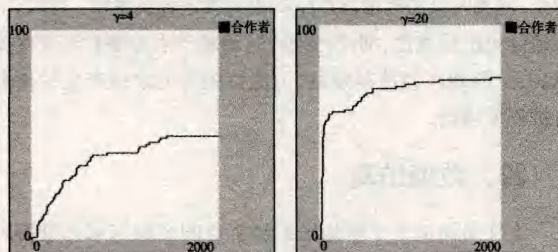


图 2 经济具有互补性且上游地区经济发达程度更高状态下的仿真结果

如果令 $\alpha = 0.5$,即下游地区经济发达程度更高,则在上下游地区经济分处同质性和互补性两种状态下的仿真结果如图 3 和图 4 所示。结果显示,当经济具有同质性时,如果 $\gamma = 4$,约有 13.7%的参与人会选择合作;当 $\gamma = 20$,约有 78.1%的参与人会选择合作。当经济具有互补性时,如果 $\gamma = 4$,约有 12.6%的参与人会选择合作;当 $\gamma = 20$,约有 74.5%的参与人会选择合作。

综合仿真结果可以发现,首先,不论上下游地区处于何种经济空间结构,随着惩戒力度的加大,越来越多的参与人将选择合作,河流污染的协同治理目标越接近实现,这与命题 3 的结论是高度一致的。其次,仿真结果还显示,上下游地区经济具有同质性时选择合作的参与人要大于具有互补性时选择合作的参与人,这是因为在经济具有同质性时,协同治理产生的福利改进相对明显。再次,当存在一个足够大的惩戒力度时,下游地区经济越发达,选择合作的参与人也越多,这也与福利改进空间有关。最后,当惩戒力度不足时,下游地区经济越发达,选择合作的参与人下降越显著,间接证明下游地区

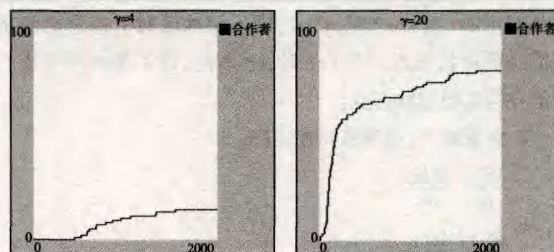


图 3 经济具有同质性且下游地区经济发达程度更高状态下的仿真结果

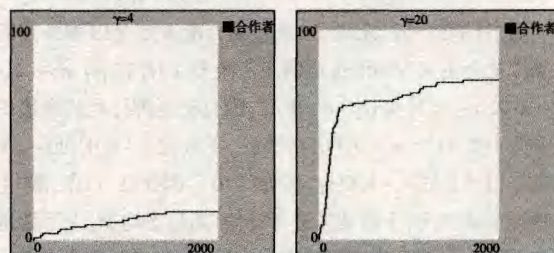


图 4 经济具有互补性且下游地区经济发达程度更高状态下的仿真结果

经济发展水平越高,越需要强有力的惩罚机制对机会主义行为予以约束。

五、研究结论与政策建议

(一)研究结论

本文通过演化博弈和仿真模拟研究了经济空间结构与河流污染协同治理行为之间的关系,并对不同稳态均衡下双方的福利状况进行了比较分析。研究发现,无论处于何种经济空间结构,补偿机制必须与足够力度的惩罚机制相互配合,上下游地区间才可能会产生稳定的污染协同治理行为。同时,经济空间结构虽然不会影响最终的稳态均衡结果,但却会影响双方的福利水平。当协同行为产生时,地区间经济的同质性越强,下游地区经济水平越高,河流污染协同治理产生的福利改进程度越高。最后,与惩罚机制相对应的制度成本是实现河流污染协同治理所必须付出的代价。

(二)政策建议

1. 严格环保立法执法,加大污染惩罚力度。在诉讼成功率一定的条件下,只有对机会主义行为的惩戒力度足够大,才能保证博弈者选择合作的收益大于因对方选择机会主义行为可能造成的损失。因此在政策层面,首先应通过严格环保立法和执法,加大对机会主义行为的惩戒力度。2014 年 4 月通过、2015 年 1 月 1 日开始实施的“史上最严格”《环境保护法(修订案)》,采取“按日计罚、上不封顶”“违规排污企业法人行政拘留”“地方官员问责”等一系列措施,约束排污主体行为,保证对污染行为的足够惩戒力度,这些都是朝正确方向进行的有益尝试。

2. 设立跨界补偿基金,强化跨界补偿沟通。根据模型结果,在河流污染协同治理过程中,跨界补偿机制与惩罚机制具有同等重要地位。为保证跨界补偿的有效实施,首先可考虑通过适当提高下游地区生产用水价格和下游地方财政予

以适当补贴“双结合”的方式,出资设立跨界补偿基金,对上游地区减少排污提供资金支持,进行正向激励。同时,还应由上下游双方及流域管理机构三方派出人员,组成相对独立的跨界补偿委员会,具体负责跨界补偿事宜以及补偿基金的管理和运作,强化跨界补偿沟通,为跨界补偿有效实施提供组织保障。

3. 降低制度成本,减少福利损耗。一方面,必要的制度成本是保证河流污染协同治理行为实现所必须的福利损耗,但另一方面,过高的制度成本可能会影响到惩罚机制作用的发挥,甚至影响协同治理目标的实现。制度成本可能源于对博弈对手行为的监督,也可能源于负担的诉讼成本。因此,加强信息披露透明度,简化诉讼程序,甚至对河流污染实行“举证责任倒置”,都可以有效地降低制度成本,也都有助于协同治理目标的实现和双方福利水平的改进。

4. 加强经济联系,形成利益共同体。虽然经济空间结构不会影响到上下游地区对于自身行为的选择,但会影响福利水平的高低。地区间经济的同质性越强,协同治理产生的福利改进空间就越大。因此,为实现河流污染的协同治理,有必要加强上下游地区之间的经济联系,多方位的形成利益共同体。“你中有我,我中有你”的经济空间结构既有利于产生更多的协同治理行为,也有利于福利空间得到更大的改进。

参考文献:

- [1] M.Zeitouna, J.Warner. Hydro -Hegemony: A Framework for Analysis of Trans -boundary Water Conflicts [J]. Water Policy, 2006, (5): 435-460.
- [2] B.Bayramoglu. Transboundary Pollution in the Black Sea: Comparison of Institutional Arrangements [J]. Environmental and Resource Economics, 2006, (4): 289-325.
- [3] F.Wirl. Tragedy of the Commons in A Stochastic Dynamic Game of A Stock Externality [J]. Journal of Public Economics Theory, 2008, (1): 99-124.
- [4] 孙冬营,王慧敏,牛文娟.基于图模型的流域跨界水污染冲突研究[J].长江流域资源与环境,2013,(4):455-460.
- [5] B.Krawczyk. Coupled Constraint Nash Equilibria in Environmental Games [J]. Resource and Energy Economics, 2005, (2): 157-181.
- [6] N.Mahjouri, M.Ardestani. Application of Cooperative and Non-Cooperative Games in Large-Scale Water Quantity and Quality Management: A Case Study [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, (2).
- [7] L.Fernandez. Wastewater Pollution Abatement across An International Border [J]. Environment and Development Economics, 2009, (1): 67-88.
- [8] 赵来军.我国湖泊流域跨行政区水环境协同管理研究[M].上海:复旦大学出版社,2009.
- [9] S.Schreider, P.Zeephongsekul, B.Abbasi, M.Fernandes. Game Theoretic Approach for Fertilizer Application: Looking for the Propensity to Cooperate [J]. Annals of Operations Research, 2013, (1): 385-400.
- [10] 赖苹,曹国华,朱勇.基于微分博弈的流域水污染治理区域联盟研究[J].系统管理学报,2013,(3):308-316.
- [11] 李昌峰,张变英,赵广川,莫李娟.基于演化博弈理论的流域生态补偿研究——以太湖流域为例[J].中国人口·资源与环境,2014,(1):171-176.
- [12] 牛文娟,王慧敏,牛富.跨界水资源冲突中地方保护主义行为的演化博弈分析[J].管理工程学报,2014,(2):64-72.
- [13] 李胜,陈晓春.基于府际博弈的跨行政区流域水污染治理困境分析[J].中国人口·资源与环境,2011,(12):104-109.
- [14] 曹洪华,景鹏,王荣成.生态补偿过程动态演化机制及其稳定策略研究[J].自然资源学报,2013,(9):1547-1555.
- [15] 徐大伟,涂少云,常亮,赵云峰.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,(2):8-14.
- [16] 郭腾云,徐勇,马国霞,王志强.区域经济结构理论与方法的回顾[J].地理科学进展,2009,(1):111-118.

责任编辑、校对:武玲玲

Stream Pollution Synergistic Governance Behavior and Welfare Analysis

Xu Zhiwei, Liu Huan

(School of Business, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China)

Abstract: By using the evolutionary game, the article studies the stream pollution governance behavior and welfare state in different economic spatial structure between upstream and downstream area. On this basis, a simulation model is also used to simulate the result of evolution stable strategy (ESS). The results show, in any economic spatial structure, the synergistic behavior can be an ESS only in the condition of combining compensation mechanism with a powerful punishment mechanism. Meanwhile, in the condition of punishment mechanism deficiency, stronger is the regional economic complementarity, higher is the upstream area economic level, greater is welfare loss for the mechanism failure. In the condition of compensation mechanism coincidence with the punishment mechanism, the regional economic homogeneity is stronger, the downstream area economic level is higher, and welfare improvement from the synergistic governance in stream pollution is higher.

Key words: economic spatial structure, stream pollution, pollution governance, synergistic governance, welfare analysis, evolution game, transboundary compensation, Jacobian matrix, steady equilibrium