



Evolutionary Game Analysis of Downstream Governments Compensation Enthusiasm Under the Basin Ecological Compensation Mechanism

Guoshun Ma, Anwen Li*, Ruxia Ma

School of Mathematics and Statistics, Northwest Normal University, Lanzhou, China

Email address:

guoshunma@163.com (Guoshun Ma), jrqqybylaw@163.com (Anwen Li), xiaruma@163.com (Ruxia Ma)

*Corresponding author

To cite this article:

Guoshun Ma, Anwen Li, Ruxia Ma. Evolutionary Game Analysis of Downstream Governments Compensation Enthusiasm Under the Basin Ecological Compensation Mechanism. *Asia-Pacific Journal of Mathematics and Statistics*. Vol. 1, No. 4, 2019, pp. 44-48.

Received: December 23, 2019 Accepted: February 19, 2020; Published: March 2, 2020

Abstract: China's basin ecological compensation mechanism is in the initial establishment stage, but it still has practical problems in some areas. In order to ensure that the mechanism operates normally and efficiently between upper and lower watersheds, further research is needed on related issues. Under the basin ecological compensation mechanism, this paper establishes a game model with the theory of evolutionary games for compensation enthusiasm interest conversion relationship between downstream governments and analyzes the evolutionary stability strategy. Without the constraints of higher-level governments, the evolutionary stability strategy of the downstream intergovernmental game is that one party actively compensates and the other passively compensates, resulting in a vicious circle of imbalances in the amount of downstream governments compensation for upstream, and it is difficult to jointly compensate for upstream environmental protection policies. After the supervision and punishment mechanism of the superior government are introduced, the evolutionary stability strategy of the downstream intergovernmental game becomes an active compensation for both parties. Therefore, the upstream government has sufficient funds to protect the governance environment, and the downstream can make full use of the advantages of resources and environment to promote economic development. Thus the operating efficiency of the basin ecological compensation mechanism is improved.

Keywords: Basin Ecological Compensation, Downstream Government, Compensation Enthusiasm, Evolutionary Stability Strategy

流域生态补偿机制中下游政府补偿积极性的演化博弈分析

马国顺, 李安文*, 马如霞

西北师范大学数学与统计学院, 兰州, 中国

邮箱:

guoshunma@163.com (马国顺), jrqqybylaw@163.com (李安文), xiaruma@163.com (马如霞)

摘要: 我国的流域生态补偿机制目前处于建立初期, 在局部还存在实践方面的问题, 为了保证机制在上下流域之间正常且高效的运行, 需要对相关问题再做进一步研究; 本文在流域生态补偿机制的设定下, 运用演化博弈的理论, 对处于下游的地方政府之间补偿积极性相关的利益转化关系建立了博弈模型, 并对演化稳定策略进行了分析。结果表明: 在无上级政府约束的条件下, 下游政府之间博弈的演化稳定策略为一方积极补偿另一方消极补偿, 造成了下游政府之间对上游补偿金额不平衡的恶性循环, 难以共同积极对上游的环境保护政策进行补偿; 在引入上级政府的监管与惩罚

机制后，下游政府间博弈的演化稳定策略变为双方都积极补偿，因此上游政府有足够的资金保护治理环境，下游也能充分利用资源环境优势来促进经济发展，从而提高了流域生态补偿机制的运行效率。

关键词：流域生态补偿，下游政府，补偿积极性，演化稳定策略

1. 引言

流域生态补偿机制是我国近年来对各个流域实行的以保护流域环境、实现流域内可持续发展为目标，利用经济手段对流域内上下游各方利益进行调节，调动生态保护积极性以及上下游用水收益平衡性的制度安排[1], [2], [3]。目前已经有很多学者对流域生态补偿这一问题做了大量的研究，徐大伟、闻琼等[4], [5]对机制中上游与下游的博弈作了分析，说明了补偿机制需要中央政府的干预才能实现双方协作的稳定均衡，而且上游政府的收益要最大；杨光明等[6], [7]在长江三峡流域的上下游政府博弈模型的基础上，分析了中央政府约束的范围以及合作初期的意愿值对上下游政府决策的影响；高鑫等[8]运用数值模拟的方法，分析了影响政府决策的各种因素；胡振华等[9]以漓江流域为例，测算出了广西省生态保护的与广东省经济赔偿的额度，并提出中央政府的惩罚约束至少为环境成本的两倍；李昌峰等[10]建立了太湖流域非参数回归计量模型，通过氧含量来计算补偿标准，分析了太湖流域生态没有明显改善的原因；禹雪中等[11]对中国流域内的流域补偿标准的完善提出了建议；关新建等[12]建立了亚产业生态补偿量化模型(ECQ-IS模型)，并指明了水污染治理方向。流域生态补偿机制的研究已经相当成熟，然而机制的初步建立仍有局部的不足[13-15]，高文军等[16]对上游政府下行为主体的生态补偿与监管决策做了模型，分析了生态补偿的水平与环境保护监管宽松的关系；胡蓉等[17]在上下游模型的基础上，提出在下游将水资源产权下放至地方并建立二级政府反馈惩罚制度。本文研究了在流域生态补偿机制中下游异地政府之间对上游政府治理环境补偿积极性的博弈策略选择问题，机制运作的过程中下游政府之间由于地理位置、经济发展的差异，流域内补偿主体责任划分模糊，对上游的补偿额度不同，容易造成补偿额度主观减少的搭便车现象，本文首先建立自然条件下两个异地政府之间的博弈模型，通过微分方程动力系统找到研究模型的演化稳定策略，然后加入上级政府进行干预的约束条件，对模型进一步改进与优化，观察上级政府的约束对机制运行能否产生积极影响。

2. 无约束的下游异地政府之间对上游补偿积极性的博弈模型

2.1. 模型假设

博弈主体为流域下游两个异地政府，设为地方政府1和地方政府2，并且假设博弈双方都是有限理性的，会在不断博弈的过程中积累经验，最后双方产生演化稳定策略；博弈开始时双方都有两种策略选择：积极补偿与消极补偿。

假设1：博弈初期下游政府具有原始收益，分别为 S_1 和 S_2 ，两个政府对上游积极补偿时，按照政策补偿金额分别为 B_1 和 B_2 ，则补偿后双方收益分别为 $S_1 - B_1$ 、 $S_2 - B_2$ 。

假设2：如果地方政府1选择积极对上游补偿，政府2逃避政策选择消极补偿时，政府1会对上游多补偿 E_1 ，而政府2对上游的补偿为 D_2 ($D_2 < B_2$)，并且由于补偿额度变少，政府2会因此获取额外收益，记为 S_2^* ，双方收益为 $S_1 - B_1 - E_1$ 、 $S_2 - D_2 + S_2^*$ 。同理，如果政府1选择消极补偿，则补偿金额为 D_1 ($D_1 < B_1$)，政府1的额外收益为 S_1^* ，此时政府2积极补偿，对上游多补偿 E_2 ，则双方收益分别为 $S_1 - D_1 + S_1^*$ 、 $S_2 - B_2 - E_2$ 。

假设3：若两地政府互不合作，都选择对上游消极补偿，则下游对上游补偿金额变少，上游政府保护治理环境资金不足，难以维持治理效果导致环境恶化，下游企业因环境因素收益下降，造成的损失分别为 C_1 和 C_2 ，双方政府收益为 $S_1 - C_1$ 、 $S_2 - C_2$ 。

假设4：下游政府积极补偿金额 B_i 远小于消极补偿下导致环境恶化造成的收益损失 C_i ，一方政府积极补偿另一方选择消极补偿时，多补偿金额 E_i 不会多于自身积极补偿的金额，即 $E_i < B_i < C_i$ ， $i = 1, 2$ 。

2.2. 模型建立

在以上假设条件下建立的博弈矩阵如表1所示：

表1 下游异地政府之间对上游补偿积极性的博弈矩阵。

政府2			
政府1	积极补偿 (x)	积极补偿 (y)	消极补偿 (1 - y)
	消极补偿 (1 - x)	(S ₁ - B ₁ , S ₂ - B ₂)	(S ₁ - B ₁ - E ₁ , S ₂ - D ₂ + S ₂ [*])
		(S ₁ - D ₁ + S ₁ [*] , S ₂ - B ₂ - E ₂)	(S ₁ - C ₁ , S ₂ - C ₂)

假设地方政府1选择积极补偿上游的可能性为 x ，选择消极补偿的可能性为 $1 - x$ ；地方政府2选择积极补偿的

可能性为 y ，选择消极补偿的可能性为 $1-y$ 。政府1选择积极补偿上游的期望收益为 U_1 ，选择消极补偿的期望收益为 U_2 ，平均期望收益为 \bar{U} ，则：

$$\begin{aligned} U_1 &= y(S_1 - B_1) + (1-y)(S_1 - B_1 - E_1) \\ &= S_1 - B_1 - E_1 + yE_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} U_2 &= y(S_1 - D_1 + S_1^*) + (1-y)(S_1 - C_1) \\ &= y(-D_1 + S_1^* + C_1) + S_1 - C_1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\bar{U} = xU_1 + (1-x)U_2 \quad (3)$$

由上式可得政府1的复制动态方程为：

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_1 - \bar{U}) = x(1-x)(U_1 - U_2)$$

$$= x(1-x)[y(E_1 + D_1 - C_1 - S_1^*) - (B_1 + E_1 - C_1)] \quad (4)$$

设政府2选择积极补偿的期望收益为 V_1 ，选择消极补偿的期望收益为 V_2 ，平均期望收益为 \bar{V} ，则：

$$V_1 = x(S_2 - B_2) + (1-x)(S_2 - B_2 - E_2) = S_2 - B_2 - E_2 + xE_2 \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} (1-2x)[y(E_1 + D_1 - C_1 - S_1^*) - (B_1 + E_1 - C_1)] \\ y(1-y)(E_2 + D_2 - C_2 + S_2^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1-x)(E_1 + D_1 - C_1 - S_1^*) \\ (1-2y)[x(E_2 + D_2 - C_2 + S_2^*) - (B_2 + E_2 - C_2)] \end{bmatrix}$$

2.3. 模型分析

由假设， x 与 y 为政府1和政府2都选择积极补偿的概率，显然有 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ 成立，由于下游政府补偿金额小于消极补偿导致的亏损，而且消极补偿的金额总是小于积极补偿的金额，可知 $E_i + D_i - C_i - S_i^* < B_i + E_i - C_i < 0$ ，故平衡点 $E(x^*, y^*)$ 在正方形区域 $[0,1] \times [0,1]$ 内，根据上述分析，将5个平衡点带入雅可比矩阵得到对应的行列式的值与迹，如表2所示：

表2 雅可比矩阵行列式与迹。

平衡点	DetJ	TrJ	结果
A(0,0)	+	+	不稳定
B(0,1)	+	-	ESS
C(1,0)	+	-	ESS
D(1,1)	+	+	不稳定
$E(x^*, y^*)$	-	0	鞍点

由表2可知，点B(0,1)、C(1,0)为稳定点，其对应演化稳定策略为(消极补偿，积极补偿)、(积极补偿，消极补偿)，即两个地方政府之间一方积极补偿另一方消极补偿，博弈的演化相位图如图1所示：

$$V_2 = x(S_2 - D_2 + S_2^*) + (1-x)(S_2 - C_2) = x(-D_2 + S_2^* + C_2) + S_2 - C_2 \quad (6)$$

$$\bar{V} = yV_1 + (1-y)V_2 \quad (7)$$

由(5)~(7)可得下游政府2的复制动态方程为：

$$G(y) = \frac{dy}{dt} = y(V_1 - V_2) = y(1-y)(V_1 - V_2)$$

$$= y(1-y)[x(E_2 + D_2 - C_2 - S_2^*) - (B_2 + E_2 - C_2)] \quad (8)$$

令 $\begin{cases} F(x) = 0 \\ G(y) = 0 \end{cases}$ ，得到系统的5个平衡点，分别是A(0,0)、

B(0,1)、C(1,0)、D(1,1)、 $E(x^*, y^*)$ ，其中 $x^* = \frac{B_2 + E_2 - C_2}{E_2 + D_2 - C_2 - S_2^*}$ ，

$y^* = \frac{B_1 + E_1 - C_1}{E_1 + D_1 - C_1 - S_1^*}$ ，动力系统的雅可比矩阵如下：

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial G(y)}{\partial x} & \frac{\partial G(y)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

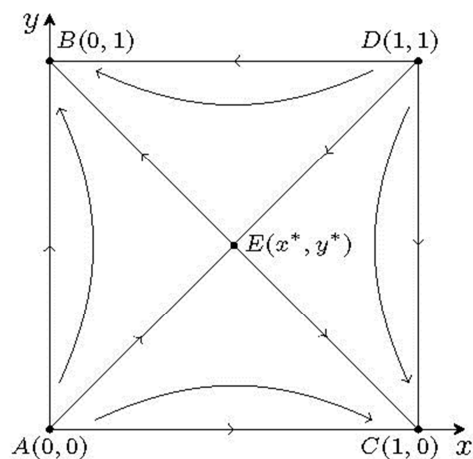


图1 无上级政府约束的动态演化相位图。

博弈初期下游政府积极响应流域生态补偿政策，然而在不断博弈的过程中，下游政府会发现己方补偿减少可以带来额外收益，而另一方只能多补偿比原先更多的金额才可以维持上游政府保护环境成果。所以在无上级政府约束的条件下，下游地方政府之间对上游的补偿会演化为双方补偿不均衡的情况，即一方政府积极补偿另一方政府消极补偿，降低了流域补偿机制的运行效率，从而需要上级政府的监督来保证流域补偿机制的运行效率。

3. 上级政府约束的下游异地政府之间对上游补偿积极性的博弈模型

若上级政府发现某下游政府在流域生态补偿机制存在消极补偿行为，则对其加收补偿差额 $B_i - D_i, i=1,2$,

表3 约束条件下下游异地政府之间对上游补偿积极性的博弈矩阵。

政府2		积极补偿 (y)	消极补偿 (1-y)
政府1	积极补偿 (x)	$(S_1 - B_1, S_2 - B_2)$	$(S_1 - B_1, S_2 - B_2 + S_2^* - C_2^*)$
	消极补偿 (1-x)	$(S_1 - B_1 + S_1^* - C_1^*, S_2 - B_2)$	$(S_1 - C_1 - C_1^*, S_2 - C_2 - C_2^*)$

根据矩阵计算政府1的期望收益如下：

$$U_1 = S_1 - B_1 \quad (9)$$

$$U_2 = y(-B_1 + S_1^* + C_1) + (S_1 - C_1 - C_1^*) \quad (10)$$

$$U_1 - U_2 = -B_1 + C_1 + C_1^* - y(-B_1 + S_1^* + C_1) \quad (11)$$

政府1复制动态方程：

$$F(x) = x(1-x)(U_1 - U_2)$$

$$= x(1-x)[(-B_1 + C_1 + C_1^*) - y(-B_1 + S_1^* + C_1)] \quad (12)$$

政府2的期望收益：

$$V_1 = S_2 - B_2 \quad (13)$$

$$V_2 = x(-B_2 + S_2^* + C_2) + (S_2 - C_2 - C_2^*) \quad (14)$$

$$V_1 - V_2 = -B_2 + C_2 + C_2^* - y(-B_2 + S_2^* + C_2) \quad (15)$$

政府2的复制动态方程为：

$$G(y) = y(1-y)(V_1 - V_2) = y(1-y)[(-B_2 + C_2 + C_2^*) - y(-B_2 + S_2^* + C_2)] \quad (16)$$

令 $F(x) = 0$ 、 $G(y) = 0$ ，得到的平衡点为：A(0,0)、B(0,1)、C(1,0)、D(1,1)、E(x^*, y^*)，其中 $x^* = \frac{-B_2 + C_2 + C_2^*}{-B_2 + S_2^* + C_2}$ 、 $y^* = \frac{-B_1 + C_1 + C_1^*}{-B_1 + S_1^* + C_1}$ ，系统的雅可比矩阵为：

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial G(y)}{\partial x} & \frac{\partial G(y)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (1-2x)[(-B_1 + C_1 + C_1^*) - y(-B_1 + S_1^* + C_1)] & x(1-x)(B_1 - S_1^* - C_1) \\ y(1-y)(B_2 - S_2^* - C_2) & (1-2y)[(-B_2 + C_2 + C_2^*) - x(-B_2 + S_2^* + C_2)] \end{bmatrix}$$

将5个点带入后各点稳定性如表4所示：

并且对其消极行为进行惩罚，记为 C_i^* ， $i=1,2$ ，其中 $C_i^* > S_i^*$ ，对于积极补偿的政府则返还多余的补偿金额，得到博弈矩阵如表3所示：

表4 雅可比矩阵行列式与迹。

平衡点	DetJ	TrJ	结果
A(0,0)	+	+	不稳定
B(0,1)	-	不确定	不稳定
C(1,0)	-	不确定	不稳定
D(1,1)	+	-	ESS
E(x^*, y^*)	-	0	鞍点

可以看出，在加入上级政府约束条件后，由于上级政府的处罚力度 C_i 大于消极补偿时额外赚取的收益 S_i ，政府积极补偿上游已经变为消极补偿的严格占优策略，从而演化稳定策略由一方积极补偿另一方消极补偿变为双方都积极补偿；说明只有在上级政府的监管与约束下，下游政府之间才能够积极向上游补偿经济，提高流域生态补偿机制的运行效率，演化过程相位图如图2所示：

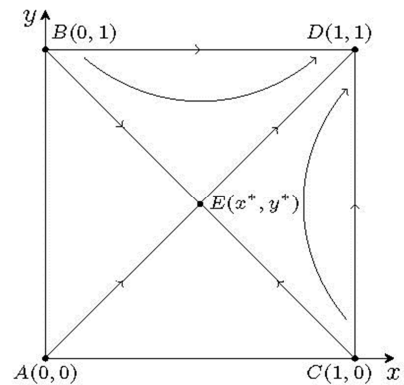


图2 上级政府约束下的动态演化相位图。

4. 结论及建议

结论表明：对于流域生态补偿机制中的下游政府群体，在无上级政府约束的条件下，政府之间对上游的补偿的积极程度会逐渐趋于一方积极而另一方消极，引入上级政府的惩罚机制后，演化稳定策略则变为全部积极参与补偿，说明上级政府监管对本机制运行的必要性及促进性；对机制在局部的运行具有指导意义。因此建议：建立流域生态补偿机制的同时，建立对流域各地方的监管体系，并制定相关的奖惩办法，鼓励促进下游政府之间共同协作积极对上游政府进行生态补偿。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(71761031)。

参考文献

- [1] 乐天中.新安江流域生态补偿机制政策探究[J].环境保护与循环经济,2019, 39 (08): 1-3.
- [2] 周大杰,董文娟,孙丽英,石缎花,齐晔.流域水资源管理中的生态补偿问题研究[J].北京师范大学学报(社会科学版),2005 (04): 131-135.
- [3] 曲富国,孙宇飞.基于政府间博弈的流域生态补偿机制研究[J].中国人口·资源与环境,2014,24(11):83-88.
- [4] 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,2012,22(02):8-14.
- [5] 闻琼. 基于演化博弈的流域生态补偿利益均衡分析[C]. 中国生态经济学学会、中国社会科学院农村发展研究所.生态经济与健康中国----中国生态经济学学会2018年学术年会摘要集.中国生态经济学学会、中国社会科学院农村发展研究所:中国生态经济学学会,2018:6.
- [6] 杨光明,时岩钧.基于演化博弈的长江三峡流域生态补偿机制研究[J].系统仿真学报,2019,31(10):2058-2068.
- [7] 杨光明,时岩钧,杨航,石良娟.长江经济带背景下三峡流域政府间生态补偿行为博弈分析及对策研究[J].生态经济, 2019, 35 (04): 202-209+224.
- [8] Gao Xin, Shen Juqin, He Weijun, Sun Fuhua, Zhang Zhaofang, Guo Weijian, Zhang Xin, Kong Yang. An evolutionary game analysis of governments' decision-making behaviors and factors influencing watershed ecological compensation in China. [J]. Journal of environmental management, 2019, 251.
- [9] 胡振华,刘景月,钟美瑞,洪开荣.基于演化博弈的跨界流域生态补偿利益均衡分析——以漓江流域为例[J].经济地理,2016,36(06):42-49.
- [10] 李昌峰,张雯英,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,2014,24(01):171-176.
- [11] 禹雪中,冯时.中国流域生态补偿标准核算方法分析[J].中国人口·资源与环境,2011,21(09):14-19.
- [12] Guan Xinjian, Hou Shengling, Meng Yu, Liu Wenkang. Study on the quantification of ecological compensation in a river basin considering different industries based on water pollution loss value. [J]. Environmental science and pollution research international, 2019, 26 (30).
- [13] 毕建培,刘晨,林小艳.国内水流生态保护补偿实践及存在的问题[J].水资源保护, 2019, 35 (05): 114-119.
- [14] 李文.流域横向生态补偿应引入激励约束机制[J].环境经济, 2019 (17): 52-57.
- [15] 吕忍,舒楠,樊进.我国流域生态补偿的发展与思考[J].治淮,2019(06):54-55.
- [16] 高文军,郭根龙,石晓帅.基于演化博弈的流域生态补偿与监管决策研究[J].环境科学与技术,2015,38 (01):183-187.
- [17] 胡蓉,燕爽.基于演化博弈的流域生态补偿模式研究[J].东北财经大学学报, 2016(03): 3-11.