

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

胡振华¹, 刘景月^{*1}, 钟美瑞^{1,2}, 洪开荣¹

(1. 中南大学 商学院, 中国湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 金属资源战略研究院, 中国湖南 长沙 410083)

摘要:以漓江流域为例, 基于演化博弈的视角探究了跨界流域上下游政府之间的利益均衡及生态补偿机制。理论研究发现, 在跨界流域中仅仅通过地方政府自身演化无法达到最优稳定均衡策略(上游保护, 下游补偿), 必须引入上级政府的激励约束机制才能确定实现最优稳定均衡策略时的参数条件。实证测算出漓江流域的环境保护成本约占该流域地区总产值的5.59%, 其中74%的环境保护成本应当由下游的广东省进行补偿。为实现最优稳定策略均衡, 还须来自于中央政府至少2倍于环境保护成本的惩罚约束。

关键词:流域生态补偿; 演化博弈; 漓江流域; 利益均衡

中图分类号:F127; X321 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-8462(2016)06-0042-08

DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2016.06.006

Interests Balance of Trans-boundary River Basin Ecological Compensation Based on Evolutionary Game Theory—Taking Lijiang Basin as a Case

HU Zhen - hu¹, LIU Jing - yue¹, ZHONG Mei - rui^{1,2}, HONG Kai - rong¹

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: How to establish an effective ecological compensation mechanism to protect the ecological environment and balance the interests of all the parties in the river basin has become an urgent problem to be solved. Taking the Lijiang River Basin as an example, the paper explores the interests balance and ecological compensation mechanism between the upstream and downstream government based on the evolutionary game theory. It is found that the optimal equilibrium strategy (upstream protection, downstream compensation) is not achieved by local government itself, and the parameters of the optimal stable equilibrium can be determined by the incentive and constraint mechanism of higher authorities. The cost of environmental protection in the Lijiang River Basin is about 5.59% of the total output value of the river basin, and 74% of the cost of the environmental protection should be compensated by Guangdong province. In order to achieve the optimal stable strategy equilibrium, the central government's penalty constraint is at least 2 times as much as the cost of environmental protection.

Key words: basin ecological compensation; evolutionary game theory; Lijiang basin; interest balance

流域水资源作为流域上下游的纽带,使上下游流域相互联系、相互影响、相互制约。作为公共物品,非排他性和外部性这两个特性使分布于不同行政区域的流域水资源在开采、使用、分配中易发生利益矛盾,导致跨行政区域的流域生态环境的恶化甚至引发生态危机。自古以来江河流域都存在着“上游受益,下游损失;上游损失,下游受益”的现

象,上游地区为追求经济利益对流域进行破坏,将成本转移到下游,形成了负的外部性。或者上游地区投入资金对流域进行保护,而下游地区无偿享受着上游地区的保护成果,这便存在着“搭便车”问题^[1]。

流域生态补偿机制的实质在于将流域生态保护的“外部性”内部化,享受资源者向利益受损者支

收稿时间:2015-10-15;修回时间:2016-02-23

基金项目:桂林市人民政府立项课题(201500001、201500009);国家自然科学基金项目(71573282);中南大学研究生创新项目(2016zzts208)

作者简介:胡振华(1962—),男,湖南邵阳人,博士,教授,博士生导师。主要研究方向为区域经济发展、计量经济学等。E-mail:huzhmail@163.com。

※通讯作者:刘景月(1992—),女,陕西汉中,人,硕士研究生。主要研究方向为区域经济学。E-mail:kerrylla@foxmail.com。

付一定费用,维护流域水资源的生态功能,并以合理有效的激励约束机制协调流域上下游的利益关系,使流域上下游切实对流域进行生态补偿,履行生态保护的职责^[2-4]。因此,建立一套合理有效的流域生态补偿机制不仅可以保护好流域生态环境,高效均衡分配流域水资源,平衡区域经济社会发展与生态环境两者之间关系,同时还可以协调不同行政管辖区域之间的利益冲突^[5]。当前,我国对流域生态补偿机制的研究与实践尚处于起步探索阶段,地方政府上下游间财政转移支付缺乏,这致使流域生态补偿严重不足,经济发展与环境之间的矛盾日益突出^[6]。

漓江源自广西,流经广东省,属于下游地区(广东省)比上游地区(广西壮族自治区)经济社会发达的流域类型,是典型“上游损失,下游受益;贫困地区保护,发达地区受益”的省际跨界流域。长期以来,广西为保护漓江生态环境做了大量的工作,也取得一定成效,但远未从根本上解决漓江生态环境的长效保护问题。流域保护中缺乏资金保障,保护与受益关系不对等,居民“靠山不能吃山,靠水不能喝水”,生活困难等问题日益加剧。此外广西作为漓江主要保护责任方,一方面工业发展受到环境保护压力的限制,另一方面旅游业的过度开发与旅游人数的上升又导致了漓江流域生态破坏加剧,环境压力与日俱增。重负的生态保护压力与国家地方财政转移支付的缺失使广西的经济发展水平与下游广东省的差距越来越大。因此构建漓江流域生态补偿机制来缓解流域生态压力、缩小区域发展差距、完善下游发达地区对上游贫困地区的补给、变“扶贫”为利益互补、协调上下游利益均衡已是迫在眉睫。

为此,本文以漓江流域生态补偿为研究对象,通过构建流域生态补偿演化博弈模型,分析跨界流域上下游政府利益均衡策略,并以漓江流域为实证,将引入激励约束机制的漓江流域跨界生态补偿演化博弈模型与综合成本法、成本分担模型相结合,测算出漓江流域的生态保护总成本额与广东省补偿额,得出最优环境保护策略(上游保护,下游补偿)状态稳定时的中央政府激励约束机制实行范围。

1 漓江流域跨界生态补偿演化博弈模型构建

漓江位于广西壮族自治区东北部,起点为桂林市兴安县溶江镇灵渠口,全长437km,流域上游河

段即称漓江,从桂林市兴安县始,途经灵川县、阳朔县至平乐县,在桂林市境内;下游河段称为桂江,从平乐县经昭平县(贺州市)、苍梧县(梧州市)至梧州市汇入浔江,二江合一称为西江,西江段出广西梧州市即入广东省。漓江流域兼具跨省、跨市、跨县的特点,构建跨界流域生态补偿机制是科学有效平衡上下游之间生态利益的根本途径。承担流域上游生态保护的广西2014年GDP总量为15 673亿元,而流域下游作为生态受益者的广东省2014年GDP总量为67 792亿元,两者的经济发展质量与效益存在明显的差距。为了方便研究,本文将漓江流域生态利益主体考虑为以广西壮族自治区为代表的上游地区,和以广东省为代表的下游地区。上下游地区都从利益最大化的角度来做出流域生态保护与补偿的决策^[6]。

1.1 模型构建的基本假设

在本假设中,位于漓江流域上游的广西壮族自治区,基于流域生态补偿政策的角度,可以选择投入资金保护漓江;基于发展全区经济角度,广西也可以选择选择不保护,充分利用流域水资源发展工业,而工业的发展一定程度会污染水资源,造成下游广东省的水质下降,用水成本上升。如果广西选择保护,那么广东省考虑到广西为保护流域生态环境所做出的贡献,可以选择向广西给予一定的补偿;当然,广东省也可以认为享用高质量的水资源是自己的权利,而不对广西做出补偿。当广西选择不保护策略的情况下,广东省同样可以选择补偿或者不补偿。

漓江流域能否建立生态补偿机制实际是两者博弈的结果。传统博弈假设博弈主体是完全理性的,然而在现实博弈问题中主体通常是有限理性的,演化博弈是有限理性主体间的博弈,有限理性下的演化稳定均衡策略并非一步到位的选择,而是策略调整和逐步演进的稳定结果^[7]。在本文研究中,流域上下游从生态补偿机制的构建到补偿标准的确定都不可能一次达成一致,而是在博弈过程中不断进行策略调整,最终找到最优策略。因而本文采用演化博弈对漓江流域的生态补偿机制进行研究。

1.2 跨界生态补偿演化博弈利益相关主体的支付矩阵

在漓江流域中,设 L 为广西选择保护策略时全区所获得的长期生态收益; C_1 为广西的流域保护成本和因保护流域而丧失的机会成本; C_2 为广东省向广西支付的生态补偿费用;设 S 为广西选择不保

护策略时全区所获得的短期收益; l 为广西选择不保护策略时广东省所获得的收益; $l_{\text{外}}$ 为广西选择保护策略时广东省所获得的正外部溢出收益。博弈支付矩阵见表1。

表1 广西壮族自治区和广东省的博弈矩阵
Tab.1 Game matrix of ecological compensation for Guangxi Zhuang Autonomous Region and Guangdong Province

广西壮族自治区	广东省	
	补偿	不补偿
保护	$(L - C_1 + C_2, l + l_{\text{外}} - C_2)$	$(L - C_1, l + l_{\text{外}})$
不保护	$(S + C_2, l - C_2)$	(S, l)

1.3 跨界生态补偿关联主体博弈的演化稳定策略

假设位处漓江流域上游的广西采用“保护”策略的比例为 x , 那么“不保护”策略的比例就为 $1-x$, 流域下游的广东省采用“补偿”策略的比例为 y , 那么“不补偿”策略的比例就为 $1-y$, 可得知广西采用“保护”和“不保护”的收益 μ_{11} 、 μ_{12} 和整个上游地区群体的平均收益 $\bar{\mu}_1$ 分别为:

$$\mu_{11} = y(L - C_1 + C_2) + (1-y)(L - C_1) \quad (1)$$

$$\mu_{12} = y(S + C_2) + (1-y)S \quad (2)$$

$$\bar{\mu}_1 = x\mu_{11} + (1-x)\mu_{12} \quad (3)$$

漓江流域下游的广东省采用“补偿”和“不补偿”的收益 μ_{21} 、 μ_{22} 和整个下游地区的平均收益 $\bar{\mu}_2$ 分别为:

$$\mu_{21} = x(l + l_{\text{外}} - C_2) + (1-x)(l - C_2) \quad (4)$$

$$\mu_{22} = x(l + l_{\text{外}}) + (1-x)l \quad (5)$$

$$\bar{\mu}_2 = y\mu_{21} + (1-y)\mu_{22} \quad (6)$$

由方程(1)、(3)可得上游地区采用“保护”策略群体的复制动态方程为:

$$F(x) = dx/dt = x(\mu_{11} - \bar{\mu}_1) = x(1-x)(L - C_1 - S) \quad (7)$$

由方程(4)、(6)可得下游地区采用“补偿”策略群体的复制动态方程为:

$$F(y) = dy/dt = y(\mu_{21} - \bar{\mu}_2) = y(1-y)(-C_2) \quad (8)$$

方程(7)和(8)构成了该博弈的动态复制系统, 根据Friedman^[8]思想, 对该系统的雅克比(Jacobi)矩阵进行局部均衡点稳定分析可以检验该博弈系统的稳定状态。因此, 为检验方程(7)和(8)所描述的群体动态系统中均衡点的稳定性, 可知方程(7)和(8)所对应的雅克比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2x)(L - C_1 - S) & C_2 \\ 0 & (1-2y)(-C_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{行列式为: } \det J = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial F(y)}{\partial y} - \frac{\partial F(y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial F(x)}{\partial y} \quad (10)$$

$$\text{迹为: } \text{tr} J = \frac{\partial F(x)}{\partial x} + \frac{\partial F(y)}{\partial y} \quad (11)$$

本文构建漓江流域跨界生态补偿演化博弈模型, 目的是分析上游地区群体和下游地区群体博弈双方各自稳定的策略组合在一起, 是否最终能演化为长期均衡稳定策略组合, 而社会最期望达到的最优策略是(保护, 补偿)组合。根据Friedman思想, 若要使策略 (x, y) 成为稳定均衡, 则需满足 $\det J > 0$, $\text{tr} J < 0$ 这两个条件, 在本文中, 若策略(保护, 补偿)为稳定均衡, 将(1, 1)代入应满足:

$$\begin{cases} \det J = (S - C_1 - L)C_2 > 0 \\ \text{tr} J = (S - C_1 - L) + C_2 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

因为 $C_2 > 0$, 可知 $S - C_1 - L > 0$, 那么 $(S - C_1 - L) + C_2 > 0$ 与上式方程组相矛盾, 方程组无解, 这说明在流域生态补偿中, 最优稳定均衡(保护, 补偿)策略无法由上游地区群体和下游地区群体的自身演化实现, 这也间接表明了若想实现最优稳定均衡需引入上级政府进行约束与激励等适当的干预。

2 引入激励约束机制的漓江流域跨界生态补偿演化博弈模型

从上述模型可以看出, 流域的生态补偿只是在广西壮族自治区与广东省之间完成一个省级政府的横向财政转移支付, 整个流域的收益并未发生改变(“保护, 补偿”策略时 C_2 抵消), 说明下游广东省的生态补偿额并未对广西的生态保护行为产生激励作用。并且当上游广西的保护成本 C_1 过大时, 上下游就会陷入“囚徒困境”, 即广西不保护, 广东省不补偿。由此可知, 为避免双方陷入非合作博弈, 必须引入一个机制对上下游政府进行约束。

因此, 在上述博弈模型的基础上引入中央政府进行干预, 在以往学者的研究中主要考虑到了中央政府的约束作用, 而对中央政府的激励行为鲜有说明, 本文在徐大伟、曲富国等研究^[6,9]的基础上引入中央政府的激励约束机制。若广西对流域进行生态环境保护而广东选择补偿策略, 中央政府对两者给予一定的奖励; 若广西对流域进行生态环境保护而广东不补偿, 中央政府应对广西进行奖励, 对广东进行处罚; 若广西选择不保护, 而广东选择补偿策略时, 中央政府对广西进行处罚, 对广东给予奖励; 若广西选择不保护, 广东选择不补偿策略时, 中央政府会对两者进行处罚。假设 B 为中央政府给

予的奖励, F 为中央政府给予单方面不履行义务博弈方的处罚, Q 为中央政府对双方同时不履行义务时给予的处罚, 此时广西与广东的博弈收益支付矩阵见表2。

表2 在中央政府激励约束机制下的
广西壮族自治区和广东省的博弈矩阵
Tab.2 Game matrix between Guangxi Zhuang
Autonomous Region and Guangdong Province under
incentive and restraint mechanism

广西壮族自治区	广东省	
	补偿	不补偿
保护	$(L - C_1 + C_2 + B, l + l_{\text{补}} - C_2 + B)$	$(L - C_1 + B, l + l_{\text{补}} - F)$
不保护	$(S + C_2 - F, l - C_2 + B)$	$(S - Q, l - Q)$

2.1 演化稳定策略分析

2.1.1 上游政府策略的演化稳定性分析

可知在中央政府激励约束机制下的上游地区群体采用保护策略的复制动态方程为:

$$G(x) = dx/dt = x(1-x)(yF - yQ + B + Q + L - C_1 - S) \quad (13)$$

令 $G(x) = 0$, 可知 $x^* = 0$ 和 $x^* = 1$ 是复制动态方程的两个稳定状态点。

① 如果 $y = y^* = (S + C_1 - L - B - Q)/(F - Q)$, $0 \leq (S + C_1 - L - B - Q)/(F - Q) \leq 1$ 成立时, 那么 $G(x)$ 始终为0, 这意味着当下游地区群体以 $y = y^*$ 的水平选择“补偿”策略时, 上游地区群体选择两种策略的收益没有区别。

② 如果 $y > y^* = (S + C_1 - L - B - Q)/(F - Q)$ 时, $x^* = 0$ 和 $x^* = 1$ 是两个稳定状态, 若 $F - Q > 0$, 则 $G'(1) < 0$, 即在 $F > Q$ 的情况下, $x^* = 1$ 是演化稳定策略, 反之, 在 $F < Q$ 的情况下, $x^* = 0$ 是演化稳定策略。可知, 若要达到“保护, 补偿”的演化稳定策略, 必须使 $F > Q$ 。那么当 $F - Q > 0$ 越大时, 则 $y > y^*$ 的条件就越容易满足, 可知, 中央政府给予单方面不履行义务博弈方的处罚 F 越大, 越容易实现最优稳定均衡策略。即当下游地区群体以 $y > y^*$ 的水平选择“补偿”策略时, 上游地区群体从“不保护”策略逐渐趋向于“保护”, 即保护策略为上游地区群体的演化稳定策略。

③ 如果 $y < y^* = (S + C_1 - L - B - Q)/(F - Q)$ 时, $x^* = 0$ 和 $x^* = 1$ 是 $G(x)$ 的两个稳定状态点, 在 $F > Q$

的情况下, 由于 $G'(0) < 0$, 所以 $x^* = 0$ 是演化稳定策略。即当下游地区群体以 $y < y^*$ 的水平选择“补偿”策略时, 上游地区群体从“保护”策略逐渐趋向于“不保护”, 即不保护策略为上游地区群体的演化稳定策略。

2.1.2 下游政府策略的演化稳定性分析

下游地区群体采用补偿策略的复制动态方程为:

$$G(y) = dy/dt = y(1-y)(xF - xQ + B + Q - C_2) \quad (14)$$

令 $G(y) = 0$, 可知 $y^* = 0$ 和 $y^* = 1$ 是复制动态方程的两个稳定状态点。

① 如果 $x = x^* = (C_2 - B - Q)/(F - Q)$, $0 \leq (C_2 - B - Q)/(F - Q) \leq 1$ 时, 那么 $G(y)$ 始终为0, 这意味着所有 y 水平均为稳定状态。当上游地区群体以 $x = x^*$ 的水平选择“保护”策略时, 下游地区群体选择两种策略的收益没有区别。

② 如果当 $x > x^* = (C_2 - B - Q)/(F - Q)$ 时, $y^* = 0$ 和 $y^* = 1$ 是两个稳定状态, 在 $F > Q$ 的情况下, 由于 $G'(1) < 0$, 所以 $y^* = 1$ 是演化稳定策略。即当上游地区群体以 $x > x^*$ 的水平选择“保护”策略时, 下游地区群体从“不补偿”策略逐渐趋向于“补偿”, 即补偿策略为下游地区群体的演化稳定策略。

③ 如果 $x < x^* = (C_2 - B - Q)/(F - Q)$ 时, $y^* = 0$ 和 $y^* = 1$ 是两个稳定状态, 在 $F > Q$ 的情况下, 由于 $G'(0) < 0$, 所以 $y^* = 0$ 是演化稳定策略。即当上游地区群体以 $x < x^*$ 的水平选择“保护”策略时, 下游地区群体从“补偿”策略逐渐趋向于“不补偿”, 即不补偿策略为下游地区群体的演化稳定策略。

2.2 关联主体策略的演化模型稳定性条件

基于上述分析可得上下游政府群体在激励约束机制下流域生态补偿演化博弈模型的均衡点有5个, 即 $(0, 0)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 1)$ 、 (x^*, y^*) , 为确定激励约束机制下流域生态补偿演化博弈模型实现稳定均衡策略的条件, 现根据 Friedman^[8] 思想, 对该系统的雅克比矩阵进行局部均衡点稳定分析^[10], 结果见表3。

可以由方程(13)和(14)所对应的雅克比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial G(x)}{\partial x} & \frac{\partial G(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial G(y)}{\partial x} & \frac{\partial G(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2x)(yF - yQ + B + Q + L - C_1 - S) & x(1-x)(F - Q) \\ y(1-y)(F - Q) & (1-2y)(xF - xQ + B + Q - C_2) \end{bmatrix}$$

根据表3可知,该演化博弈的稳定性与下游地区的原有收益 l 无关,需根据上游地区群体的收益参数值的大小来判断。这表明在该演化博弈中,均衡点的稳定性只与上游地区群体的决策相关,上游地区群体的决策是决定该演化博弈均衡点稳定性的关键。根据表3可知若要 $D(1,1)$ 为稳定策略,则要满足条件: $\begin{cases} F+B+L-C_1-S>0 \\ F+B-C_2>0 \end{cases}$,假设 $D(1,1)$ 为稳定策略,则其稳定性可分为三种情况:

情况一:当 $\begin{cases} L-C_1+C_2+B>S+C_2-F \\ L-C_1+B>S-Q \\ F+B-C_2>0 \end{cases}$ 时, $D(1,1)$ 为唯一的稳定策略。

1)为唯一的稳定策略。

情况二:当 $\begin{cases} L-C_1+C_2+B>S+C_2-F \\ S-Q>L-C_1+B \\ F+B-C_2>0 \\ Q+B-C_2>0 \end{cases}$ 时, $D(1,1)$ 为唯一的稳定策略。

1)为唯一的稳定策略。

情况三:当 $\begin{cases} L-C_1+C_2+B>S+C_2-F \\ S-Q>L-C_1+B \\ F+B-C_2>0 \\ Q+B-C_2<0 \end{cases}$ 时, $D(1,1)$ 和 $A(0,0)$ 同为该博弈的稳定策略。

1)和 $A(0,0)$ 同为该博弈的稳定策略。

由表4中稳定性分析结果可知在满足前两种情况下 $D(1,1)$ 为唯一的稳定策略,在第三种情况下 $D(1,1)$ 和 $A(0,0)$ 同为该博弈的稳定策略这一结论成立,复制动态相位图如图1。

综上所述,只有当满足情况一、情况二条件时,该演化博弈才存在唯一的稳定均衡策略。可得出在此条件下中央政府的激励约束机制(惩罚金额 F 、 Q 与奖励金额 B)范围为:

$$\textcircled{1} \begin{cases} F+B>S+C_1-L \\ B+Q>S+C_1-L \\ F+B>C_2 \end{cases} \quad (15)$$

表3 局部稳定性分析

Tab.3 Partial stability analysis result

均衡点	$det.J$	$tr.J$
A(0,0)	$(B+Q+L-C_1-S)(B+Q-C_2)$	$2B+2Q+L-C_1-C_2-S$
B(1,0)	$-(B+Q+L-C_1-S)(F+B-C_2)$	$C_1+S-Q-L+F-C_2$
C(0,1)	$-(F+B+L-C_1-S)(B+Q-C_2)$	$F+L-C_1-S+C_2-Q$
D(1,1)	$(F+B+L-C_1-S)(F+B-C_2)$	$-(2F+2B+L-C_1-C_2-S)$
$E(x^*, y^*)$	$-\frac{(C_2-B-Q)(S+C_1-L-B-Q)(F-C_2+B)(F-S-C_1+L+B)}{F-Q}$	0

表4 三种情况下局部稳定性分析结果

Tab.4 Partial stability analysis result of 3 conditions

情况一				情况二			情况三		
均衡点	$det.J$	$tr.J$	稳定性	$det.J$	$tr.J$	稳定性	$det.J$	$tr.J$	稳定性
A(0,0)	+	+	不稳定	-	±	不稳定	+	-	ESS
B(1,0)	-	+	不稳定	+	+	不稳定	+	+	不稳定
C(0,1)	-	±	不稳定	-	±	不稳定	+	+	不稳定
D(1,1)	+	-	ESS	+	-	ESS	+	-	ESS
$E(x^*, y^*)$	±	0	鞍点	±	0	鞍点	±	0	鞍点

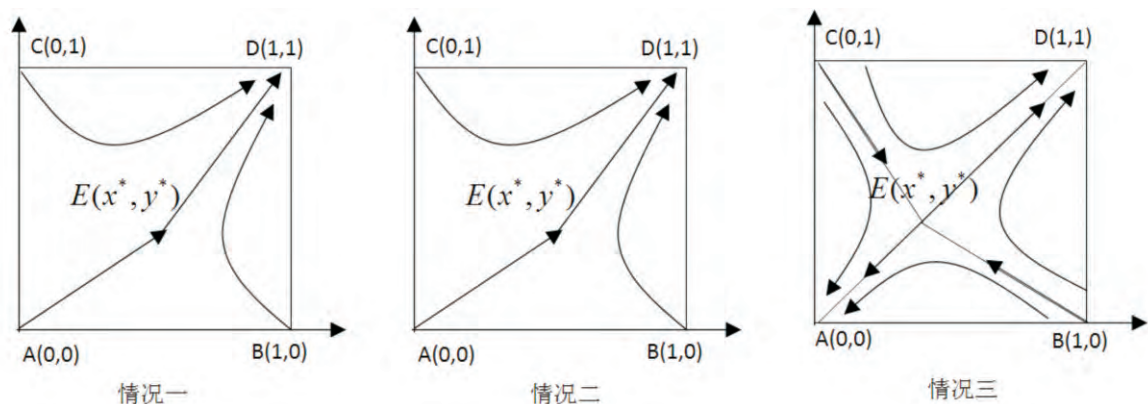


图1 上下游群体复制动态相位图

Fig.1 Replication dynamics between upstream and downstream

$$\textcircled{2} \begin{cases} F+B>S+C_1-L \\ C_2<B+Q<S+C_1-L \\ F+B>C_2 \end{cases} \quad (16)$$

3 漓江流域生态补偿利益均衡的实证结果分析

根据上述模型结论可知,根据广西选择保护策略时全区所获得的长期生态收益 L 、广西的流域保护成本和因保护流域而丧失的机会成本 C_1 、广东省向广西支付的生态补偿费用 C_2 、广西选择不保护策略时全区所获得的短期收益 S 这四个数值,即可得出在激励约束机制中若要实现唯一稳定均衡策略时中央政府的激励约束范围。通过对漓江流域上游的广西进行农业机会成本评估、生态建设和环境保护成本分析和工业发展机会成本核算,估计出漓江流域上游地区的综合投入成本 C_1 ,建立成本分担模型并结合下游地区广东省用水资源实际情况估计出补偿金额 C_2 ,在测算出流域保护成本与补偿金额基础上与前述演化博弈模型进行理论与实际的结合,估计出漓江流域要实现稳定均衡策略的条件。

3.1 漓江流域上游地区生态保护成本评估

保护成本的核算是生态补偿机制中的核心问题,我国学者在生态补偿标准研究中运用有能值分析法^[3,5]、综合成本法^[9,11]、支付意愿法^[4]、考核断面水质法^[12]等。能值分析法通常测算为生态补偿最大值,支付意愿法则为最小值,机会成本法介于二者之间,当前我国流域生态补偿实践中如新安江、鄱阳湖等流域的补偿标准测算主要采用考核断面水质法,而漓江流域由于上游保护得当,上下游水质各项监测指标达标率均为100%,结合实际本文采用综合成本法对漓江流域进行测算。

3.1.1 农业损失评估

广西以涵养水源、保持水土为目的,对漓江进行水源林建和防护林建设。“十二五”期间退耕还林工程规划为1.5万 hm^2 ,防护林体系建设规划造林面积为1.6万 hm^2 ,封山育林1.2万 hm^2 。根据桂林市“十二五”期间国民经济和社会发展统计公报可知每公顷农作物耕地的平均经济收入为40 055元。

国家退耕还林工程的补助标准为经济林补助5年,生态林补助8年,退耕还林每年补助300元/ hm^2 ,造林费一次性补助750元/ hm^2 ^[13]。因此在补偿期内每年因退耕还林损失费用11 926万,补偿期外每年损失费用12 016万。

3.1.2 生态建设和环境保护成本评估

由于漓江的保护与治理主要责任方是广西桂林市,现根据桂林市漓江保护“十二五”规划,结合水利、林业与环境保护“十二五”规划,将漓江流域上游地区生态建设和环境保护的各项直接成本与间接成本估计整理见表5,其中直接成本包括林业建设、水污染防治、重点水源工程、水土保持与水生态修复等;间接成本包括防洪工程、节水工程等。为保持水土,对漓江流域进行石漠化治理,“十二五”规划造林面积为1.6万 hm^2 ,封山育林1.2万 hm^2 ,林业建设投资额是根据漓江上游每年生态造林与封山育林投资额计算的结果,其中生态造林投入为3 000元/ hm^2 ,封山育林为600元/ hm^2 。

3.1.3 工业发展机会成本评估

保护漓江让桂林市承担了生态保护成本,也为桂林带来生态服务价值,2014年桂林市旅游业总收入为420.3亿元,占全市GDP总额的23%,占第三产业增加值的65.78%。但由于保护环境所丧失的机会成本也是难以估量的,主要体现在以工业为主导的第二产业。桂林与南宁、柳州为广西三大城市,由表6可知,与柳州、南宁相较,桂林市第三产业的发展主要建立在旅游业之上,而旅游业对桂林市经济发展的贡献度存在边际效益递减效应,桂林市在工业与第三产业中除旅游业外的其它行业仍有较大的发展空间。然而漓江环境保护的压力不得不让桂林市在工业发展上放慢步伐,本文通过计算流域纳污能力客观评估桂林市工业发展机会成本。

漓江流域上游地区普遍为Ⅰ类和Ⅱ类水质标准,根据桂林市环境状况公报,“十二五”期间桂林市年平均COD排放总量为8 208t,假定工业COD排放量和工业增加值成正比,漓江流域上游地区多年出境水量为189亿 m^3 ,每立方米的水纳污价值按0.40元计算^[11],其纳污价值为75.6 $\times 10^8$ 元。以水环境功能区水质标准(Ⅲ类)为基数,漓江流域上游地

表5 桂林市“十二五”期间漓江流域生态建设和环境保护年度投资平均额 单位:万元

Tab.5 Annual investment of ecological construction and environmental protection of Lijiang River Basin during the “12th Five Year Plan” period in Guilin

林业建设	水污染防治	防洪工程	重点水源工程	水土保持与生态修复	节水工程	合计
1 104	70 060	16 540	11 580	6 360	10 060	115 704

区水资源的允许纳污总量大约相当于 $37\ 800 \times 10^4 \text{tCOD}$ 。目前,上游地区排放量约 $8\ 208 \text{t}$,其纳污价值为 $3\ 283$ 元,剩余的纳污价值约 $755\ 983$ 万元全部转移到了下游地区。

表6 桂林、柳州、南宁市2014年三产GDP/亿元
Tab.6 Added value of three production in Guilin, Liuzhou and Nanning City in 2014

	第一产业	第二产业	第三产业
桂林市	323.07	865.05	638.93
柳州市	157.72	1 272.54	738.85
南宁市	355.09	1 251.54	1 541.67

3.2 漓江流域生态保护总成本及主体分担额估计

综上研究可以得到上游地区总成本 C_1 为 88.3613×10^4 万元,占桂林市年均GDP的5.59%,直接成本为 $1\ 157.04 \times 10^4$ 万元,主要是生态建设和环境保护成本;间接成本共计 $7\ 679.09 \times 10^4$ 万元,其中农业损失估计值为 $11\ 926$ 万元,工业发展机会成本估计值为 75.5983×10^4 万元。以生态建设和环境保护成本进行分担为补偿的下限,以综合成本进行分担为参考标准。

3.2.1 成本分担模型

本文从水量、水质、用水效益三个方面对流域生态保护的主体分担和补偿额进行测算,得到流域生态保护年补偿量模型^[14-15]为:

$$C_2 = C_1 \times K_{sl} \times K_{sz} \times K_{xy}$$

式中: K_{sl} 为水量分配系数; K_{sz} 为水质分配系数; K_{xy} 为效益分配系数。

3.2.2 成本分担估计

水量分配系数 K_{sl} 为流域下游地区利用上游水量 $SL_{下游}$ 占上游总水量 $SL_{总}$ 的比例,即 $K_{sl} = SL_{下游} / SL_{总}$, $0 < K_{sl} \leq 1$ 。由于漓江完全汇入西江,所以可知 $K_{sl} = 1$ 。

水资源利用中,如果上游提供的水质越好,则下游所产生的效益越高,因此下游需分担的成本需引入水质修正系数。取COD值作为上下游交界断面处要求水质指标,假设要求水质指标值为 $S(\text{mg/L})$,当交界断面处水质实际值 $Q < S$ 时,表明上游地区提供的水质较好,此时下游地区需对少排放的COD量 $P_i(t)$ 进行补偿。补偿额用上游地区在生态保护中每年削减单位COD排放量的投入 M (万元/t)来估算,则上游地区因向下游提供更好水质的补偿为 $P_i(t)M$,可知 $K_{sz} = 1 + (P_i(t)M) / (C_i K_{sl})$ ^[14],在本研究中,由于漓江上游水质与下游水质各项监测

指标达标率均为100%,因此 $K_{sz} = 1$ 。

按照“谁受益谁补偿”的生态补偿原则,受益多的地区多承担,受益少的地区少承担,不受益的地区则不承担。因此在流域生态保护年补偿量模型中引入效益分配系数 K_{xy} ,该系数根据万元GDP耗水量 HS 确定。 $K_{xy} = (1/HS_{下游}) / (1/HS_{上游} + 1/HS_{下游})$,其中 $HS_{上游}$ 表示上游地区万元GDP耗水量, $HS_{下游}$ 表示下游地区万元GDP耗水量^[1]。在本研究中, $HS_{下游}$ 取值为2014年广东省万元GDP用水量为 65m^3 , $HS_{上游}$ 即广西万元GDP用水量为 185.6m^3 ,因此 $K_{xy} = 0.74$ 。

3.3 引入激励约束机制的漓江流域跨界生态补偿演化博弈模型估计结果

综上可知广东省以生态建设和环境保护成本进行分担的补偿下限为 8.562×10^5 万元,按综合成本需分担与补偿的补偿标准参考为 65.3873×10^4 万元,占广东省年均GDP的0.11%,已知补偿参考值 $C_2 = 65.3873 \times 10^4$ 万元。假设 $S = L + C_1$,结合式(18)条件可知当中央政府给漓江流域跨界生态补偿的奖励约束机制满足 $B + F > 2C_1 = 176.7226 \times 10^4$, $B + Q > 2C_1 = 176.7226 \times 10^4$ (单位:万元)时可实现演化博弈稳定均衡策略;结合式(19)可知当中央政府给漓江流域跨界生态补偿的激励约束机制满足 $B + F > 176.7226 \times 10^4$, $176.7226 \times 10^4 > B + Q > 65.3873 \times 10^4$ (单位:万元)这两个条件时可实现演化博弈稳定均衡策略。同时,中央政府给漓江流域跨界生态补偿的奖励约束机制至少为成本的2倍是实现稳定均衡策略必须满足的条件。

4 结论与建议

生态补偿机制是保护流域生态环境、均衡跨界流域各方利益的有效手段。本文以漓江流域为例,通过构建演化博弈理论分析了跨界流域上下游政府之间复制动态方程以及演化稳定策略,并进行了稳定性分析。在理论分析的基础上结合漓江流域的实际情况,运用综合成本法和成本分担模型测算出上游广西每年投入的保护成本和下游广东省应分担的补偿额。最后得出漓江流域实现最优稳定均衡策略时中央政府的激励惩罚总额与条件。

第一,在跨界流域生态补偿中,仅仅依靠上下游政府之间的自主演化来实现最优的稳定均衡策

略(保护,补偿)是不可能的,而引入上级政府建立合理有效的激励约束机制可推动跨界流域生态补偿博弈实现最优稳定均衡策略,从而形成长效生态补偿实现社会最优。引入激励约束机制的演化博弈模型研究表明,分属上下游的广西与广东的博弈能否实现稳定均衡策略与上游地区群体的决策相关,而与下游地区群体的决策无关。

第二,在有激励约束机制下的漓江流域跨界生态补偿演化博弈模型中,中央政府的激励约束机制总金额满足式(15)、(16)时,演化系统的群体动态可实现唯一最优均衡策略(保护,补偿)。并且中央政府给予单方面不履行义务博弈方的处罚 F 越大,越容易实现最优稳定均衡策略。

第三,实证测算结果表明,每年广西为保护漓江流域投入的成本 C_1 约为 88.3613×10^4 万元,占漓江主要保护责任方桂林市年产值的 5.59%,漓江下游广东省每年应承担的补偿额 C_2 为 65.3873×10^4 万元,约为保护成本的 74%。若要实现漓江流域的稳定均衡策略,中央政府的激励约束总额 $B+F$ 至少为保护成本的 2 倍。

当前我国在新安江、鄱阳湖、闽江等流域进行生态补偿机制的试点试行,其中江西省已实现生态补偿机制覆盖全境,新安江流域则是我国首个跨省流域生态补偿机制试点。漓江流域存在着保护成本较高、保护与受益不对等的问题,要想实现漓江流域生态可持续发展要加快建立和完善漓江流域的生态补偿机制,中央政府应和分属上下游的广西壮族自治区、广东省尽快签订有激励约束机制的生态补偿协议,出台流域生态补偿法律法规,规范两者的保护补偿行为。首先,国家要完善中央财政补偿机制,通过中央财政转移支付、给予政策上的优惠与支持、设立生态建设专项资金、加强生态移民的转移就业培训工作,加快农民脱贫致富进程等来帮助扶持广西壮族自治区,对跨界流域的生态补偿可通过加快生态补偿立法、调整税收、政策倾斜等实行激励约束机制。其次,要完善省级政府财政补偿机制,广东省和中央政府应实行横向纵向财政转移支付相结合来承担部分生态补偿额度,补偿额度中央政府和广东省可按比例分担。补偿方式除地方政府财政转移支付外还可积极探索多种补偿方式,例如可以通过项目补偿的方式进行,广东省经济发达,可在漓江流域上游建设一批污染小、效益

好的工业园区,从而实现互惠共赢。此外,还可通过现代农业合作,利用广西的农业优势和土地优势构建农果业产业链等,通过多种渠道帮助广西加强本区经济发展能力,实现生态补偿。最后,广西应努力发展循环经济、特色经济等提升本区经济实力,利用国家和广东省的政策与项目支持促使本区经济实现良性循环,大力吸引社会各界力量保护漓江,比如当前桂林与中华环保基金会合作设立漓江生态环境保护专项资金等,同时,还需加强在政府主导下的生态补偿市场化。

参考文献:

- [1] 孔凡斌. 江河源头水源涵养生态功能区生态补偿机制研究——以江西东江源区为例[J]. 经济地理, 2010, 30(2): 299 – 305.
- [2] Han Q Y, Huang X P, Shi P. Ecological compensation and its application in marine ecological resources management [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1): 126 – 130.
- [3] 白景峰. 跨流域调水水源地生态补偿测算与分配研究——以南水北调中线河南水源地为例[J]. 经济地理, 2010, 30(4): 657 – 661.
- [4] 周晨, 李国平. 流域生态补偿的支付意愿及影响因素——以南水北调中线工程受水区郑州市为例[J]. 经济地理, 2015, 35(6): 38 – 46.
- [5] 伏润民, 缪小林. 中国生态功能区财政转移支付制度体系重构——基于拓展的能值模型衡量的生态外溢价值[J]. 经济研究, 2015, 50(3): 47 – 61.
- [6] 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.
- [7] 洪开荣. 经济博弈论[M]. 北京: 经济科学出版社: 2014.
- [8] Friedman D. Evolutionary Games in Economics [J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637 – 666.
- [9] 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(11): 83 – 88.
- [10] 陈艳萍, 吴凤平, 周晔. 流域初始水权分配中弱势群体间的演化博弈分析[J]. 软科学, 2011, 25(7): 11 – 15.
- [11] 乔旭宁, 杨永菊, 杨德刚, 等. 流域生态补偿标准的确定——以渭干河流域为例[J]. 自然资源学报, 2012(10): 1 666 – 1 676.
- [12] 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: 14 – 19.
- [13] 李国平, 石涵予. 退耕还林生态补偿标准, 农户行为选择及损益[J]. 中国人口·资源与环境, 2015(5): 152 – 161.
- [14] 刘强, 彭晓春, 周丽旋, 等. 城市饮用水水源地生态补偿标准测算与资金分配研究——以广东省东江流域为例[J]. 生态经济, 2012(1): 33 – 37.
- [15] 付意成, 阮本清, 许凤冉, 等. 永定河流域水生态补偿标准研究[J]. 水利学报, 2012, 43(6): 740 – 748.