

基于强互惠理论的湘江流域 生态补偿演化博弈研究¹

谭婉冰

【摘要】：湘江流域水资源的合理使用与保护已经成为了湖南经济健康发展的重要前提，湖南省十三五规划对其十分重视。生态补偿目前已经成为了缓解长江中游地区及湘江流域上、下游之间矛盾冲突的主要手段之一。本文通过分析湘江流域生态补偿各利益相关者的利益冲突，建立了以湘江流域上、下游为主体的演化博弈数理模型。研究表明：如果没有强互惠政府的出现，上、下游难以达到上游保护下游补偿的博弈平衡。

【关键词】：强互惠理论、生态补偿、博弈

【中图分类号】：F062.2

【文献标识码】：A

【文章编号】：1009-5675（2018）03-158-08

近年来，湖南省政府对于湘江流域生态补偿日益重视，2012 至今，陆续出台了《湖南省湘江保护条例》、《湘江流域重金属污染治理实施方案》、《湘江流域生态补偿（水质水量奖罚）暂行办法》、《湖南省贯彻落实〈水污染防治行动计划〉实施方案（2016-2020 年）》等一系列规章制度。

现有阶段，生态补偿的主要手段是通过设定适宜的补偿机制，减轻甚至解决经济的正外部性及负外部性问题，进而提高整个社会的福利水平。根据《湘江流域生态补偿（水质水量奖罚）暂行办法》，目前湘江流域生态补偿主要根据“按绩效奖罚”的原则，对跨市、县断面进行水质和水量的考核。保护越好，奖励越多，污染越严重，惩罚越严厉。水资源具有典型的公共资源属性，流域上、下游对水资源的利用容易产生社会边际成本的不相等。因此，除了目前实行纵向生态补偿，跨界水环境补偿机制的建立也十分重要。因此，《湖南省贯彻落实〈水污染防治行动计划〉实施方案（2016-2020 年）》中提出，探索采取横向资金补助、对口援助、产业转移等方式，建立跨界水环境补偿机制，推进全省生态环保转移支付改革。在跨界水环境生态补偿中，补偿者（环境保护的受益者与环境破坏者）与被补偿者（环境保护者与利益受损者）根据“谁保护谁受益，谁污染谁赔偿”的原则，在补偿标准上进行持续的动态博弈。

本文将流域生态补偿作为研究主体，通过构建上、下游用水 Agent 博弈场景，对流域生态补偿演化博弈模型进一步拓展，引入了强互惠政府，阐述强互惠政府在跨界水资源生态治理中的特殊作用和地位，并模拟湘江流域进行计算机模拟仿真分析，得到最优的环境保护（保护—补偿）策略状态稳定时惩罚金的范围。

一、文献回顾

（一）流域生态补偿研究

目前，对于生态补偿定义，国外学者更倾向于从“为生态服务付费”（Payment for Environmental Services, PES）^①的角度进行阐述。他们认为，生态环境的受益方或破坏方通过衡量生态服务对其自身的价值量，向环境保护者进行一定程度的经济补偿以保证和激励其环保行为。因此，国外研究者对于生态补偿的研究和运用多从市场化的角度展开。Wunder 等（2008）^②

¹【作者简介】：谭婉冰，中南大学商学院硕士研究生，长沙，410083。

认为生态服务应该完全市场化,包括流域生态破坏补偿和流域生态重构与建设补偿,以此达到最优的生态补偿。在生态补偿支付意愿的研究上,Morana 等(2007)^③通过问卷调研的研究方式,选取苏格兰地区人民作为调查主体,发现该地区民众对于环境和社会福利越关注,生态补偿支付的意愿越强烈。Kosoy 等(2007)^④选取 3 个中美地区的案例展开问卷调查和比较研究,发现在该区域流域生态补偿过程中上游的机会成本大于下游实际支付的补偿金额,据此提出了根据机会成本核算流域生态补偿金额的方法并提出相应建议。

基于中国现有国情,补偿标准的核算和跨界协调问题历来是流域生态补偿学者们研究的焦点。在流域生态补偿量核算方法的研究上,徐大伟等(2008)^⑤从政策研究的角度,提出了基于河流水质水量的跨区域流域生态补偿量测算的原则及计算模型。在跨界协调补偿机制的研究方面,陈志松(2008)^⑥等运用演化博弈理论对政府和水资源生产商进行博弈分析,推演出了均衡稳定情况。王军锋(2013)^⑦从补偿资金来源的视角,将上、下游流域生态补偿模式归纳成四种,并提出了相应完善补偿机制的建议。李昌峰、张栾英(2014)^⑧等在上下游地方政府博弈情景的设定的基础上加入上一级政府监管作为约束因子,以太湖流域为例进行实证分析,推演出最优的环境保护策略状态时的惩罚金范围。

(二) 强互惠理论研究

“强互惠”概念最早由 Gintis 于 2000 年提出^⑨,强互惠主义者要求合作的对等性,即使自身需要付出比较高的代价,也坚持惩罚群体中的不合作者和破坏合作者。因此,一个群体中即使只有很小部分的强互惠主义者,已经足以使群体内不同主体之间的演化博弈均衡保持稳定^⑩。

目前对于强互惠的研究,集中于强互惠的成因及影响因素两个方面。成因归纳起来主要有内在激励说和生存进化说。Herbert Gintis(2008)等^⑪认为道德是人类的天性使然,道德行为本身是一种适应且使人类对环境具有更强的适应性。李佳等(2012)^⑫从“不公平厌恶”及“心理理论和共情”两个维度来解释引起利他惩罚行为的认知及利他惩罚行为的情绪加工机制,解释了引发强互惠行为产生的原因。叶航(2012)^⑬的研究揭示出维护合作的正义感是人类适应生存环境的逐渐进化的结果,是

2①Nicolask, Man'nez-TunaM, Muradian R, et al. Payment for environmental services in watersheds: Insights from a comparative study of three cases in Central America[J]. Ecological Economics, 2007, 61 (2/3) : 446-455.

②WunderS, Engel S, Pagiola S. Taking Stock: A Comparative Analysis of Payments for Environmental Services Programs in Developed and Developing Countries[J].Ecological Economics, 2008, 65 : 834-852.

③Moran D, McVittie A, AllcroftD J, et al. Quantifying Public Preferences for Agrienvironmental Policy in Scotland: A Comparison of Methods[J]. Ecological Economics, 2007, 63(1): 42-53.

④Kosoy N, Martinez-Tuna M, Muradian R, et al. Payments for Environmental Services in Watersheds: Insights from a Comparative Study of Three Cases in Central America[J]. Eco-logical Economics, 2007, 61: 446-455.

⑤徐大伟, 郑海霞, 刘民权. 基于跨界水质水量指标的流域生态补偿量测算方法研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(4): 189-194.

⑥陈志松, 王慧敏, 仇蕾. 流域水资源配置中的演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2008, 16(6): 176-183.

⑦王军锋, 侯超波. 中国流域生态补偿机制实施框架与补偿模式研究基于补偿资金来源的视角[J]. 2013, 23(2): 23-29.

⑧李昌峰, 张栾英, 赵广川. 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(1): 171-176.

⑨Gintis H. Strong reciprocity and human sociality[J]. Journal of Theoretical Biology, 2000, 206: 169-179.

⑩Gintis H, Bowles S, Boyd R, et al. Explaining altruistic behavior in humans[J]. Evolution and Human Behavior, 2003, 24: 153-172.

⑪HerbertGintis, JosephHenrich, SamuelBowles, et al. Strong Reciprocity and the Roots of Human Morality[J]. Social Justice Research, 2008, 21(2): 241-253.

⑫李佳, 蔡强, 黄禄华, 王念而, 张玉玲. 利他惩罚的认知机制和神经生物基础[J]. 心理科学进展, 2012, 20(5): 682-689.

社会规范内部化的产物，通过自然选择被固化在我们身体和心智中。ShawAlex（2012）^①的研究则表明，人们表现出强互惠行为更多是基于声誉的考虑而不是为了保护合作的进行。

对于强互惠影响因素的研究，AlpaslanAkay（2011）^②通过观察惩罚者的信仰对强互惠行为的影响，强调了有条件合作的重要性，表明只有当惩罚是合理且合法的时候才会报之以更多的信任。MartijnEgas（2008）^③运用实验研究利他性惩罚维持合作的临界点，通过改变惩罚惩罚效果，得出合作只在利他性惩罚是相对有利的情况下才会得到维持。

近些年，政府型强互惠（governmental strong reciprocity）对行为影响的研究逐渐成为研究热点。政府型强互惠是王覃刚等基于 SantaFe 经济学家研究的基础上，将自愿者性质的强互惠扩展到职业化层面后提出的一个新概念^④。王覃刚（2014）^⑤提出强互惠政府要积极而公平地充当利他惩罚者，无论何种形式的行为模式遭遇推卸责任或不合作等情况。由于强互惠政府具有较强的信息及行为能力，其固定存在使得群体间有意义的合作和利他行为被政策规范化，从而实现社会资源的有效配置。李锋、尹洁等（2015）^⑥基于政府型强互惠理论对高校科研创新团队合作行为进行了研究，结果表明政府型强互惠强制惩罚群体中的推卸责任者的行为可有效推动社会群体合作演化。强互惠理论运用于水资源冲突方面，王慧敏、于荣（2014）^⑦认为在水资源冲突过程中，政府在实施利他惩罚时，体现了是代理人的身份表达了其对违背规则的行为的纠正和对合作秩序的维持。

二、流域生态补偿博弈模型的构建

（一）流域生态补偿博弈情景设定

本文以湘江流域的实际情况进行具体分析。湘江流域基本位于湖南省境内，上游流经永州、郴州等地区，经济和社会水平相较于下游的长株潭地区较为落后。生态补偿模式归属于典型的“下游收益、上游损失”。为了简化分析，在该博弈模型中，将利益主体概括为湘江上游地区政府与湘江下游地区政府。

湘江流域的上游地区，整体的水域质量相较于下游地区好，处于水资源的强势地位，而在经济发展水平上，相对于下游地区而言，则处于弱势地位。对于整体河水质量较好而经济发展较慢的上游地区而言，水质优劣对于上游地区人民生活影响不明显，通过牺牲环境换取经济效应的动力明显大于下游地区。因此，上游地区常常损害其自然环境与可持续发展能力换取地方经济的发展。尽管在发展高能耗、高污染的产业会给上游地区的环境造成一定的影响，但相较于关闭这类企业保护地方环境所带来的损失而言，发展所带来的经济收益一般大于关闭所带来的经济损失。因此，上游地区用水群体在实施水域生态保护的过程中，所选择的策略是保护或不保护。相反，下游地区的经济、社会发展水平程度高，对于水质的要求高于上游地区，牺牲环境换取经济效益的动力相对于上游较小，所以为了能获得更好的生活、生产环境，一定程度上下游地区愿意支付一定的补偿费用换取更优质的环境。对于下游地区用水群体而言，在实施湘江流域生态环境的保护过程中，可以选择向上游支付生态补偿

^①叶航. 公共合作中的社会困境与社会正义——基于计算机仿真的经济学跨学科研究[J]. 经济研究, 2012(8): 132-145.

^②Shaw Alex, Santos Laurie. Lab support for strong reciprocity is weak: punishing for reputation rather than cooperation[J]. The Behavioral and brain sciences, 2012, 35(1): 39.

^③AlpaslanAkay, GokhanKarabulut, Peter Martinsson. The Effect of Religion on Cooperation and Altruistic Punishment: Experimental Evidence from Public Goods Experiments[J]. IZA Discussion Paper, 2011: 61-79.

^④MartijnEgas, Amo Riedl. The economics of altruistic punishment and the maintenance of cooperation[J]. Proceedings. Biological sciences /The Royal Society, 2008, 275 (1637): 871-878.

^⑤Kasper W, Streit M E. 制度经济学——经济秩序与公共政策[M]. 韩朝华, 译. 北京: 商务印书馆, 2000

^⑥王覃刚. 基于历史视角的政府型强互惠模型的经验解说[J]. 宏观经济, 2014, 11: 55-56.

^⑦李锋, 尹洁. 高校科研创新团队合作行为研究——基于政府型强互惠理论[J]. 科研管理, 2015, 4: 24-25.

^⑧王慧敏, 于荣, 牛文娟. 基于强互惠理论的漳河流域跨界水资源冲突水量协调方案设计[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(8): 2170

或是不支付补偿。追求自身的利益最大化是上、下游地区用水群体共性，而保护—补偿策略则是生态文明建设所期盼的最优策略。

（二）流域生态补偿博弈支付矩阵在湘江流域生态补偿博弈模型中，假定为：

R_1 代表上游地区选择不保护策略时的初始收益，即初始收益；

ΔR_1 代表上游地区保护环境的直接成本和损失的机会成本；

ΔR_2 代表上游地区通过环境保护时，所获得的经济收益；

U 代表上游地区选择不保护策略时下游地区的初始收益；

ΔU_1 代表下游地区通过向上游地区进行生态补偿时，下游地区所获得的效益；

C 代表下游地区向上游地区的生态补偿值；

于是，上下游地区的生态补偿收益矩阵如图 1 所示。

上游地区	下游地区	
	补偿	不补偿
保护	$R_1 - \Delta R_1 + \Delta R_2 + C, U + \Delta U_1 - C$	$R_1 - \Delta R_1 + \Delta R_2, U + \Delta U_1$
不保护	$R_1 + C, U - C$	R_1, U

图 1 湘江流域上下游用水群体的收益矩阵

由于湘江流域面积较广，流经多个地州市，所涉及的上下游用水群体并不只有一个，因此，假设上游地区用水群体采取保护策略的比例为 x ，下游地区用水群体选择补偿策略的比例为 y 。则 $1-x$ 为采取不保护策略的比例， $1-y$ 为采取不补偿策略的比例。 $x=1$ ，表明上游地区用水群体全部选择保护策略； $y=1$ ，表明下游地区用水群体全部选择补偿策略。反之， $x=0$ ，表明上游地区用水群体全部选择不保护策略； $y=0$ ，表明下游地区用水群体全部选择不补偿策略。

这样，上游选择保护策略的期望收益为 U_{11} ，选择不保护的期望收益为 U_{12} ，整个上游地区的平均收益为 U_1 ：

$$U_{11} = y(R_1 - \Delta R_1 + \Delta R_2 + C) + (1-y)(R_1 - \Delta R_1 + \Delta R_2) \quad (1)$$

$$U_{12} = y(R_1 + C) + (1-y)R_1 \quad (2)$$

$$U_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12} \quad (3)$$

下游选择支付补偿策略的期望收益为 U_{21} ，选择不支付的期望收益为 U_{22} ，整个下游地区的平均收益为 U_2 ：

$$U_{21} = x(U + \Delta U_1 - C) + (1-x)(U - C) \quad (4)$$

$$U_{22} = x(U + \Delta U_1) + (1-x)U \quad (5)$$

$$U_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22} \quad (6)$$

根据动态复制方程，上、下游地区的动态复制方程分别为：

$$F(x) = dx/dt = x(u_{11} - u_1) = x(1-x)(\Delta R2 - \Delta R1) \quad (7)$$

$$F(y) = dy/dt = y(u_{21} - u_{22}) = y(1-y)(-C) \quad (8)$$

上式（7）和（8）组成该博弈的动态复制系统。通常，通过分析局部均衡点的稳定性可以研究动态复制系统的演化稳定策略。根据 Friedman 的提出的方法，局部均衡点的稳定性分析可通过该系统的雅可比矩阵的局部稳定性分析得到，由此对式（7）和（8）所描述的动态系统进行 Jacobi 矩阵的局部稳定性分析。式（7）和（8）的 Jacobi 矩阵对应的行列式和其迹为：

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

$$= \begin{bmatrix} (1-2x)(\Delta R2 - \Delta R1) & 0 \\ 0 & (1-2y)(-C) \end{bmatrix} \quad (9)$$

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

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

由 Friedman 的思想可知，如果策略（x，y）为稳定均衡策略，则相应的有行列式 $\det J > 0$ ，迹 $\text{tr} J < 0$ 。同时，社会所期望的最优策略（保护一补偿）为稳定策略，即（x=1，y=1），因此，带入式（10）和（11）中，应有：

$$\begin{cases} \det J(1,1) = (\Delta R1 - \Delta R2)C > 0 \\ \text{tr} J(1,1) = (\Delta R1 - \Delta R2) + C < 0 \end{cases}$$

由于下游对上游的生态补偿值 $C > 0$ ，因此根据 $\det J > 0$ 有 $\Delta R1 - \Delta R2 > 0$ ，但这与 $\text{tr} J < 0$ 相矛盾，所以，在此情况下，方程无解。在没有一个外部干预的情况下，仅仅依靠上下游用水群体之间自发地选择来实现整个社会所期望的最优稳定策略（保护一补偿）是不可能实现的。间接的说明了在流域生态补偿中，需要一个强互惠政府，通过行政干预，使得上下游政府自身演化朝着最优的稳态均衡点靠近。

（三）引入政府型强互惠理论后的流域生态补偿博弈模型

由于上下游地区用水群体主体之间的对等性，尽管下游地区更期望上游地区采取生态保护策略，但自身并不具有法律上的约束能力，使得对上游的行为进行一个约束，这也正是演化博弈难以走向社会所期望的最优策略（保护，补偿）的原因。现在，在之前的模型中引入一个强互惠政府，在湘江流域中，即湖南省人民政府。由于省政府能够以政府型的强互惠身份出现，作为上下游流域用水群体利益的协调者，能够有效地通过行政手段干预上下游用水群体利益之间的冲突问题。

如果上游地区用水群体选择环境保护策略，而下游地区并未给予上游地区支付生态补偿费用，则省级政府将对下游地区用水群体进行经济处罚；如果下游用水群体选择支付生态补偿而上游地方用水群体并未采取生态保护策略，则省级政府将对上游进行经济惩罚。因此，将变量 F 设为经济惩罚并引入到博弈中，形成新的上游地区和下游地区的收益矩阵（图 2）。

上游地区	下游地区	
	补偿	不补偿
保护	$R1-\Delta R1+\Delta R2+C, U+\Delta U1-C$	$R1-\Delta R1+\Delta R2, U+\Delta U1-F$
不保护	$R1+C-F, U-C$	$R1, U$

图 2 引入经济惩罚后的上下游地区收益矩阵

此时，上游选择保护策略的期望收益为 $U11'$ ，选择不保护的期望收益为 $U12'$ ，整个上游地区的平均收益为 $U1'$ ：

$$U11' = y(R1 - \Delta R1 + \Delta R2 + C) + (1-y)(R1 - \Delta R1 + \Delta R2) \quad (12)$$

$$U12' = y(R1 + C - F) + (1-y)R1 \quad (13)$$

$$U1' = xU11' + (1-x)U12' \quad (14)$$

下游选择支付策略的期望收益为 $U21'$ ，选择不支付的期望收益为 $U22'$ ，整个下游地区的平均收益为 $U2'$ ：

$$U21' = x(U + \Delta U1 - C) + (1-x)(U - C) \quad (15)$$

$$U22' = x(U + \Delta U1 - F) + (1-x)U \quad (16)$$

$$U2' = yU21' + (1-y)U22' \quad (17)$$

于是，上游地区采取动态复制的策略为：

$$F(x) = dx/dt = x(u11' - u12') = x(1-x)(yF + \Delta R2 - \Delta R1) \quad (18)$$

下游地区采取动态复制的策略为：

$$F(y) = dy/dt = y(u21' - u22') = y(1-y)(xF - C) \quad (19)$$

在各自的动态复制过程中，均出现了博弈的对手方 y 与 x ，这意味着，由于强互惠政府对于不合作的个体进行经济处罚，使得上下游用水群体合作与补偿策略的比例发生变化，如果处罚的金额达到一定程度，将有可能引导上下游用水群体的决策朝着社会期望的策略演变。下面我们分别对上下游政府的演化路径及稳定策略做出分析

上游地区用水群体的演化路径及策略

对式 (12) 求关于 x 的一阶导有：

$$F'(x) = (1 - 2x)(yF + \Delta R2 - \Delta R1) \quad (20)$$

令 $F(x) = 0$ ，根据动态复制方程，可得 $x^*=1$ 和 $x^*=0$ 两个可能的稳定动态点。

1. 当 $y^* = \frac{\Delta R1 - \Delta R2}{F}$ 时，总有 $F(x) = 0$ 成立，即对于所有 x 水平都是稳定状态。即当下游以 $(\Delta R1 - \Delta R2) / F$ 的水平选择补

偿策略时，上游地区选择保护或不保护策略的收益没有区别，因此对于所有 x 都是上游地区用水群体的稳定状态

2. 当 $y > y^* = \frac{\Delta R1 - \Delta R2}{F}$ 时， $x^*=0$ 和 $x^*=1$ 是 x 的两个可能的稳定状态点。由于 $F(1) < 0$ ，所以， $x^*=1$ 是稳定演化策略。即当下游群体以高于 $(\Delta R1 - \Delta R2) / F$ 的水平选择补偿策略时，上游用水群体逐渐地由不保护策略转向保护策略。因此保护策略是上游群体的演化稳定策略。

3. 当 $y < y^* = \frac{\Delta R1 - \Delta R2}{F}$ 时， $x^*=0$ 和 $x^*=1$ 是 x 的两个可能的稳定状态点。由于 $F(0) < 0$ ，所以 $x^*=0$ 是稳定演化策略。即当下游群体以低于 $(\Delta R1 - \Delta R2) / F$ 的水平选择补偿策略时，上游用水群体逐渐地由保护策略转向不保护策略。因此不保护策略是上游群体的演化稳定策略。

下游用水群体的演化路径及策略：

对于式 (13) 求关于 y 的一阶导有：

$$F'(y) = (1 - 2y)(xF - C) \quad (21)$$

令 $F(y) = 0$ ，根据动态复制方程，可得 $y^*=1$ 和 $y^*=0$ 两个可能的稳定动态点。

1. 当 $x^* = \frac{C}{F}$ 时，总有 $F(y) = 0$ 成立，即对于所有 y 水平都是稳定状态。此时，当上游用水群体以 C/F 的水平选择保护策略时，对于下游用水群体选择补偿或不补偿所带来的收益没有区别。所以对于所有的 y 都是下游用水群体的稳定状态。

2. 当 $x > x^* = \frac{C}{F}$ 时， $y^*=1$ 和 $y^*=0$ 两个可能的稳定动态点。由于 $F(1) < 0$ ，所以 $y^*=1$ 是稳定演化策略。即当上游用水群体以高于 C/F 的水平选择保护策略时，下游群体逐渐地由不补偿策略向补偿策略转移。因此补偿策略是下游用水群体的演化稳定策略。

3. 当 $x < x^* = \frac{C}{F}$ 时， $y^*=1$ 和 $y^*=0$ 两个可能的稳定动态点。由于 $F(0) < 0$ ，所以 $y^*=0$ 是稳定演化策略。即当上游用水群体以低于 C/F 的水平选择保护策略时，下游用水群体逐渐地由补偿策略向不补偿策略转移。因此不补偿策略是下游群体的演化稳定策略。

同时，上述式中的稳定动态点介于 $(0, 1)$ 之间，因此，暗含着 $y^* = \frac{\Delta R1 - \Delta R2}{F}$ 与 $x^* = \frac{C}{F}$ 也介于 $(0, 1)$ 之间。于是可以得到以下约束条件：

$$0 \leq x^* = \frac{C}{F} \leq 1 \quad (22)$$

$$0 \leq y^* = \frac{\Delta R1 - \Delta R2}{F} \leq 1 \quad (23)$$

于是得出 $0 \leq C \leq F, 0 \leq \Delta R1 - \Delta R2 \leq F, \Delta R2 \leq \Delta R1$ 即第一，对于不合作者的罚金应至少大于下游所附补偿费用与上游地区通过牺牲环境获得的收益与保护环境获得的收益之差的较大值；第二，上游地区通过牺牲环境所获得的收益应大于上游通过保护环境所获得的收益。

在有了上述的约束条件下，对于式（18）和（19）的 Jacobi 矩阵进行分析：

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

$$= \begin{bmatrix} (1-2x)(yF + \Delta R2 - \Delta R1), & x(1-x)F \\ y(1-y)F & (1-2y)(XF - C) \end{bmatrix} \quad (24)$$

接下来我们将四种策略带入矩阵中，求出相应的行列式与迹，如图 3 所示：

局部均衡点	Det(J)	Tr(J)
(0,0)	$(\Delta R2 - \Delta R1)(-C)$	$(\Delta R2 - \Delta R1 - C)$
(1,0)	$(\Delta R1 - \Delta R2)(F - C)$	$(\Delta R1 - \Delta R2 + F - C)$
(0,1)	$(\Delta R2 - \Delta R1 + F)C$	$(\Delta R2 - \Delta R1 + F + C)$
(1,1)	$(\Delta R2 - \Delta R1 + F)(F - C)$	$(\Delta R1 - \Delta R2 - 2F + C)$
(x^*, y^*)	$\frac{C(F - C)(\Delta R1 - \Delta R2)(F - \Delta R1 + \Delta R2)}{F^2}$	(0)

图 3 系统雅可比矩阵

将之前所求的约束条件带入系统雅可比矩阵中，进行局部稳定性分析，如图 4

局部均衡点	Det.(J)	Tr.(J)	稳定性
(0,0)	(+)	(-)	稳定点
(1,0)	(+)	(+)	不稳定点
(0,1)	(+)	(+)	不稳定点
(1,1)	(+)	(-)	稳定点
(x^*, y^*)	(-)	(0)	鞍点

图 4 均衡点的局部稳定性分析结果

由上图可知，(0, 0) 和 (1, 1) 具有局部稳定性，是演化稳定策略。(1, 0) 和 (0, 1) 为该系统的点， (x^*, y^*)

为鞍点。此时，上下游地方政府之间的博弈动态演化过程，可以由图 5 描述。

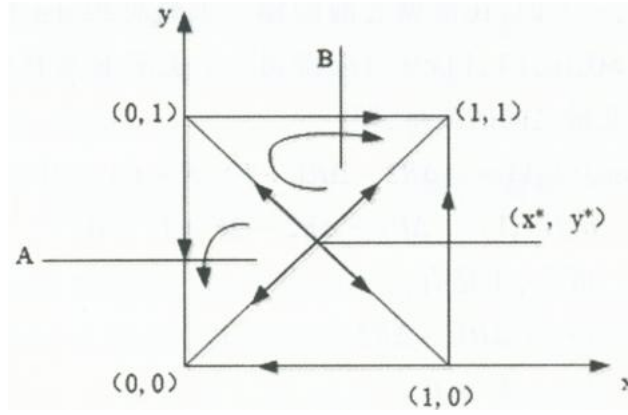


图 5 复制动态相位图

上图描述了在强互惠政府的介入下，上游用水 Agent 群体与下游用水 Agent 群体之间的博弈行为的动态演化过程。由不稳定点 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 和鞍点 (x^*, y^*) 连城的直线将整个区域划分为了 A、B 两个小区域，它是系统 $(0, 0)$ 和 $(1, 1)$ 两个状态演化的分界线。如果最初的状态落在 A 区域内，则系统将会向 $(0, 0)$ 点收敛，即上下游用水 Agent 群体的策略是（不保护、不补偿）。如果最初时的状态落在 B 区域内，则系统将会向 $(1, 1)$ 点收敛，即上下游用水 Agent 群体的策略是（保护，补偿），走向整体社会所期望的最优稳定策略。

通过对鞍点 (x^*, y^*) 参数的调整可以改变区域 A、B 的相对面积，从而改变系统不同稳定点收敛的概率，使系统朝着不同的方向的演变。

综上所述，首先较之在无强互惠政府的约束下，即未引入对不合作的惩罚时，后者能够使得系统朝着社会所期望的（保护，补偿）策略方向移动，而前者是不可能走向（保护，补偿）策略；

其次，尽管在强互惠型政府背景下，上下游用水群体之间的博弈行为动态演化过程，并不能一定保证系统朝着社会的期望策略移动，也有可能走向（不保护，不补偿）的策略，所以，系统的最终走向一方面取决于初始状态点所所在的区域，另一方面，取决于鞍点的位置。

最后，在于鞍点相关的参数中，有 F 、 C 、 $\Delta R1$ 及 $\Delta R2$ 四个参数，它们的大小共同决定了鞍点的位置，而鞍点位置的不同，造成了不同的 A、B 区域，从而对整个系统的演化产生影响。而在以上影响鞍点的四个参数中，只有 F 是能够由强互惠型政府决定具体金额的大小，其他三个变量与之无关。所以，对于惩罚金额 F 范围的确定，就尤为重要。于是，一方面，在根据之前的稳定策略思想 $\det. J(1, 1) > 0$ ， $\text{tr}. J(1, 1) < 0$ 可以得到一个关于 F 与其他三个变量之间的关系，即：

$$\begin{cases} \det. J(1,1) = (\Delta R2 - \Delta R1 + F)(F - C) > 0 \\ \text{tr}. J(1,1) = \Delta R1 - \Delta R2 - 2F + C < 0 \end{cases} \quad (25)$$

成立,于是有:

$$\begin{cases} F > \Delta R1 - \Delta R2 \\ F > C \end{cases} \quad (26)$$

所以，F 的范围应该大于 C 与 $\Delta R1 - \Delta R2$ 中的最大值；而另一方面，在鞍点 (x^*, y^*) 中，为了让系统朝着社会期望的点移动，因此，初始点的位置应该尽可能地落入 B 区域内，这也就意味着 $x^* \rightarrow 0, y^* \rightarrow 0$ ，所以作为分母的 F 而言，越大的处罚金额，在数学意义上意味着越能是 B 的区域增大，在经济上的意义则意味着较大的处罚金额能够对群体中的不合作者起到一个约束作用，从而引导整个群体朝着期望的策略移动。

三、数据仿真分析

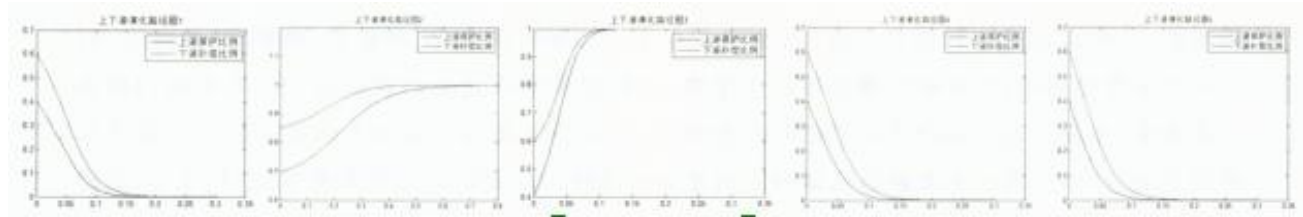
根据上述演化博弈推演，假设上游地区保护环境的直接成本和损失的机会成本是 100 个单位，通过环境保护所获得的生态价值是 50 个单位。生态补偿政策选择上，由于下游处于经济发达地区，且生态环境相对上游地区较差，环境保护意识往往强于上游，因此，假设初始采取生态补偿横向转移支付的比例上游为 0.4，下游为 0.6。同时，为了模拟现实中用水个体的学习过程，为仿真中群体的各个成员设置学习率参数，表示个体的学习速度。将上、下游用水 Agent 的学习率均设为 0.3，建立仿真情景如图六所示。

序号	仿真情景	仿真参数设置					
		$\Delta R1$	$\Delta R2$	F	C	x	y
1	$F > \Delta R1 - \Delta R2, F > C$	100	50	60	40	0.4	0.6
2	$F > \Delta R1 - \Delta R2, F > C$	100	50	60	40	0.7	0.85
3	$F > \Delta R1 - \Delta R2, F > C$	100	50	120	40	0.4	0.6
4	$F < \Delta R1 - \Delta R2, F > C$	100	50	45	40	0.4	0.6
5	$F > \Delta R1 - \Delta R2, F < C$	100	50	60	80	0.4	0.6

图六 仿真情景设置

采用 MATLAB 进行仿真，结果如图七所示。

上下游演化路径图一是仿真设置中初始情况下上、下游的演化博弈。通过计算可得知，该种情况设定下，演化博弈的鞍点值为 $x^* = \frac{C}{F} = 0.67$ ， $y^* = \frac{\Delta R1 - \Delta R2}{F} = 0.83$ 。当上、下游政府环保意识不够强烈，仅有 40% 的上游群体愿意采取保护策略，0.6 的下游群体愿意采取补偿策略时，博弈将最终走向 $x^* \rightarrow 0, y^* \rightarrow 0$ 的公共资源困境。因此，当惩罚力度不够大时，只有当上、下游群体环保意识较强时，博弈才能走向（保护，补偿）的局面，如图二。当省级政府的惩罚力度较大，在仿真中表现为惩罚变量 F 远大于 C 时，如上下游演化路径图三，此时鞍点值变为 $x^* = \frac{C}{F} = 0.33$ ， $y^* = \frac{\Delta R1 - \Delta R2}{F} = 0.42$ ，相对于仿真情形一，博弈更容易走向对社会最优的上游保护、下游补偿策略。



图七仿真结果

当惩罚量 $F < \Delta R1 - \Delta R2$ ，及惩罚量小于上游通过牺牲环境所获得的经济效益与保护湘江流域所获得的经济效益的差值时，对上游来说，不进行湘江流域水资源保护将获得更多的收益，因此，惩罚将最终走向上游不保护、下游不补偿的困境，如演化路径四。同样，当湘江流域地区对上游地区的生态补偿值超过强互惠省级政府的惩罚值时，大部分下游群体将选择接受强互惠政府的惩罚而不是保护补偿湘江流域，最终影响博弈均衡走向公地悲剧，如演化路径图五。

四、结论及建议

本文从湘江流域的现实情况出发，基于演化博弈，采用动态复制方程，建立了湘江流域上、下游地区用水 Agent 的博弈模型，并引入强互惠政府，据此进行演化博弈稳定性分析。通过 MATLAB 仿真分析，进一步对演化博弈模型进行验证。研究结论表明：在湘江流域生态补偿上下游的博弈中，如果没有强互惠政府的介入，结果只能是“公地悲剧”，使得博弈均衡走向（不保护，不补偿）。只有强互惠政府以一定的程度干预上下游生态补偿，演化博弈才能走向对社会最优的（保护，补偿）策略。同时，惩罚力度将直接影响鞍点的位置，对博弈均衡产生很大的影响。

因此，笔者建议，在湘江流域生态补偿问题中，湖南省政府应努力担当好其强互惠政府的角色，对湘江流域上下游地区采取不同的行政强制手段。

具体而言，对湘江上游地区，尤其是以有色金属为支柱产业的郴州，在现有“按绩效奖罚”的基础上，建立湘江流域“复合式”财政转移支付体系，监督上游进行水质保护。建立上、下游协商机制，促进上、下游地区间协商建立水质补偿标准，即上游对水质保护越好，下游支付的生态补偿越多，以此降低上游进行流域生态保护的成本，提升上游进行生态保护的意愿。

对于湘江流域下游地区，通过强制行政监管，在纵向惩罚补偿的基础上建立下游地州市对上游地州市的资金补助、对口援助等横向补偿机制。同时，鼓励湘江下游经济发达地区向上游地区提供水质保护、污水处理技术，分享流域生态保护经验，从而实现经济、科技等全方位多领域的立体生态补偿。

同时，健全湘江流域生态保护及生态补偿的法律制度建设，包括湘江流域开发利用相关的法律制度、跨界水资源保护的法律制度、流域生态补偿管理制度等制度的建设，明确和强化强互惠政府的监管作用，提高上、下游生态补偿的约束力和权威性。加大湘江流域生态环境保护的宣传力度，通过强化上、下游的环保意识，增强上游的保护意愿及下游的支付意愿，从根本上改变湘江流域生态环境的现状。