【区域开放与合作】

# 博弈视角下东江流域横向生态补偿的可持续性研究

刘慧芳 武心依

**摘 要**：东江流域横向生态补偿政策实施3年来，取得了一定成效，也存在一些问题。我们运用完全信息动态博弈和演化博弈方法研究东江流域横向生态补偿利益相关方的得失权衡、策略选择和博弈结果。研究表明，中央政府的出资和监管对横向生态补偿的实施有显著影响，补偿金额的增加和政治考评的严格有利于江西省政府进行水质改善，而政治考评收益的高低是广东省是否愿意支付补偿金额度的决定性因素。研究进一步关注了江西、广东两省企业和个人作为利益相关方对博弈结果的影响。结果表明，江西省将部分生态补偿金用于当地污染产业的转型升级，广东省向全省污染产业和生态依赖产业征收部分生态补偿金，都有利于横向生态补偿的可持续发展。

**关键词**：东江流域；横向生态补偿；动态博弈；演化博弈

**中图分类号**：F205 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-5766(2020)04-0131-09 **收稿日期**：2020-05-20

**作者简介**：刘慧芳，女，中国地质大学（北京）经济管理学院教授，博士生导师（北京 100083）。

武心依，女，北京大学城市与环境学院硕士生（北京 100871）。

## 一、引言

东江是珠江第三大水系，发源于江西省赣州市寻乌桠髻钵山南侧，江西省内流域面积为3532.6平方千米；南流入广东省内流域面积约为23540平方千米。东江是流域沿岸及珠三角、香港等地的重要饮用水水源，其水质好坏直接影响区域可持续发展，生态安全战略地位非常重要。经过多年发展建设，东江已基本解决了洪、涝、旱、咸、潮等灾害，为流域地区社会经济发展提供了有利条件，但由于东江源区矿产资源丰富、畜禽养殖业经济比重大，大量矿产资源开发和畜禽养殖业排污造成的水污染问题仍较为严重。

为解决东江流域水生态问题，作为中国流域横向生态补偿的试点，2016年10月，江西、广东两省政府在中央政府的大力推动下签订了《东江流域上下游横向生态补偿协议》（2016—2018）。协议商定，每年中央财政出资3亿元、江西和广东两省各出资1亿元作为补偿资金，专项用于东江源头水污染防治和生态环境保护与建设工作。补偿方式以跨省界断面水质为考核依据，若江西省年均出境水质达到Ⅲ类标准并逐年改善，则广东省和中央政府共同补偿江西省4亿元；若水质未达到考核要求，则江西省需补偿广东省1亿元。协议实施3年来，江西省出境水质达标率100%，东江流域水生态环境得到明显改善。2019年12月，江西、广东两省政府签署了新一轮《东江流域上下游横向生态补偿协议》（2019—2021）。

虽然生态补偿协议的实施取得了水环境改善成效，但现行补偿模式的补偿标准、补偿方式、补偿对象等仍存在一定的问题和争议。杨中茂等（2017）研究了东江流域横向生态补偿的措施及成效；孙治仁（2017）提出应积极试点东江流域上下游水环境容量交易、实行“异地减污”“异地开发”等市场机制下的生态补偿；高振斌等（2018）研究了东江

流域19个县市生态补偿额度及优先级顺序；卢志文（2018）指出包括东江在内的五大流域横向生态补偿试点面临着补偿主体权利义务不明确、补偿标准不科学、补偿方式单一、补偿协商平台存在缺陷的困境。本文梳理了东江流域横向生态补偿的相关方利益诉求，通过构建政府间完全信息动态博弈和演化博弈模型，分析中央政府和两省政府的策略选择与博弈结果，并通过构建考虑两省企业和个人利益得失的博弈模型，为东江流域横向生态补偿的可持续发展提出建议。

## 二、东江流域横向生态补偿的利益相关方

现实中，东江流域生态补偿涉及的利益相关方有三个层级，如图1所示。中央政府作为行政的最高层级和流域所有权人的代表，追求全局利益最大化，希望的是江西和广东两省社会经济发展、与中央政府一致推进生态文明建设。江西省政府和广东省政府处于第二层级，受中央政府的领导、监督和管理，追求的是本省经济社会发展、生态环境改善和政治考评良好。两省的企业和个人位于第三层级，受各省政府的管辖，考虑的是企业利润、个人收入和就业。这些相关方的利益诉求存在一定矛盾和冲突，一方获益可能造成另一方损失，而博弈分析有助于了解各方利益得失、明确各方行为选择以及博弈的均衡结果。

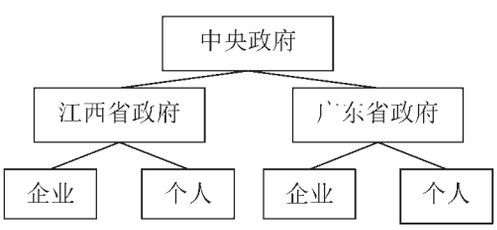


图1 东江流域横向生态补偿的利益相关方

## 三、政府间动态博弈分析

现行《东江流域上下游横向生态补偿协议》中，江西省政府是上游水环境治理者和被补偿方，中央政府和广东省政府是水质改善的受益者和补偿方，而两省企业和个人的参与度较低。因此，暂不考虑企业和个人利益诉求，建立政府间博弈模型，分析当前生态补偿模式的可持续条件。

1.政府间博弈模型构建

完全信息动态博弈是指参与人的行动有先后顺序，且后行动者能观测到先行动者的选择；每个参与人对其他所有参与人的特征、战略和支付函数都有准确认识的博弈。在生态补偿协议签订与实施的过程中，首先由中央和广东省政府选择是否对跨省水质改善进行补偿，继而江西省政府选择是否提升水质。理想状态下，中央和两省政府对自身及其他参与人的信息了解是完全的，因而可用完全信息动态博弈中的序贯博弈构建政府间博弈模型。

基本假设。博弈参与人为补偿方和受补偿方，中央政府和广东省政府组成补偿方整体，江西省政府是接受补偿方。其中，江西省和广东省政府具有相同地位，而中央政府对两省政府有监管和政治考评的权利。行动次序上，中央和广东省政府作为补偿方是先行动者；江西省政府作为被补偿方是后行动者，根据中央和广东省政府的策略而做出行动反应。补偿方有实行或不实行生态补偿两种策略选择；被补偿方则可选择是否对水污染进行控制治理，从而使得东江流域上游水质的改善或不改善。决策时，中央、广东省和江西省政府决策时信息了解是完全的。参与人的支付函数是由补偿金收支和水质改善带来的经济、社会、政治收益组成的综合收益。博弈中各参与人的目标是实现自身收益最大化。

变量设定。$C_d$：江西省进行水污染治理的直接成本；$C_o$：江西省进行水污染控制和减排所付出的机会成本；$C_z$：中央政府在生态补偿协议签订和实施中付出的监管成本；$F_1$：江西省支付广东省的补偿金，即生态补偿协议下，江西省出境水质不达标时，江西省需支付给广东省的1亿元；$F_2$：广东省支付江西省的生态补偿金，即生态补偿协议下，江西省出境水质达标时，广东省补偿江西省的1亿元；$F_3$：中央政府对江西省的奖励金，即生态补偿协议下，江西省出境水质达标时，中央政府奖励江西省的3亿元；$RI_1$，$RI_2$：江西省、广东省由于流域水质改善获得的经济收益，可分别用两省三次产业生产用水收益表示；$RR_1$，$RR_2$：江西省、广东省由于流域水质改善获得的社会收益，可分别用两省居民生活用水收益表示；$W_3$：中央政府推进东江流域生态文明建设获得的政治收益；$Z_1$，$Z_2$：江西省政府、广东省政府与中央政府保持一致，实施东江流域横向生态补偿所获

得的政治收益；以上变量均为正值。

支付函数。根据基本假设和变量设定，江西省政府、广东省政府、中央政府的支付函数$\pi_1$、$\pi_2$、$\pi_3$，以及中央和广东省政府作为补偿方整体的支付函数$\pi_s$，分别如式(1)—式(4)所示，则不同策略组合中各政府的收益如图2所示。

$$\pi_1 = RI_1 + RR_1 + Z_1 + F_2 + F_3 - F_1 - C_d - C_o \quad (1)$$

$$\pi_2 = RI_2 + RR_2 + Z_2 + F_1 - F_2 \quad (2)$$

$$\pi_3 = RI_1 + RR_1 + RI_2 + RR_2 + W_3 - F_3 - C_o - C_s \quad (3)$$

$$\pi_s = RI_1 + RR_1 + 2^*RI_2 + 2^*RR_2 + Z_2 + W_3 + F_1 - F_2 - F_3 - C_o - C_s \quad (4)$$

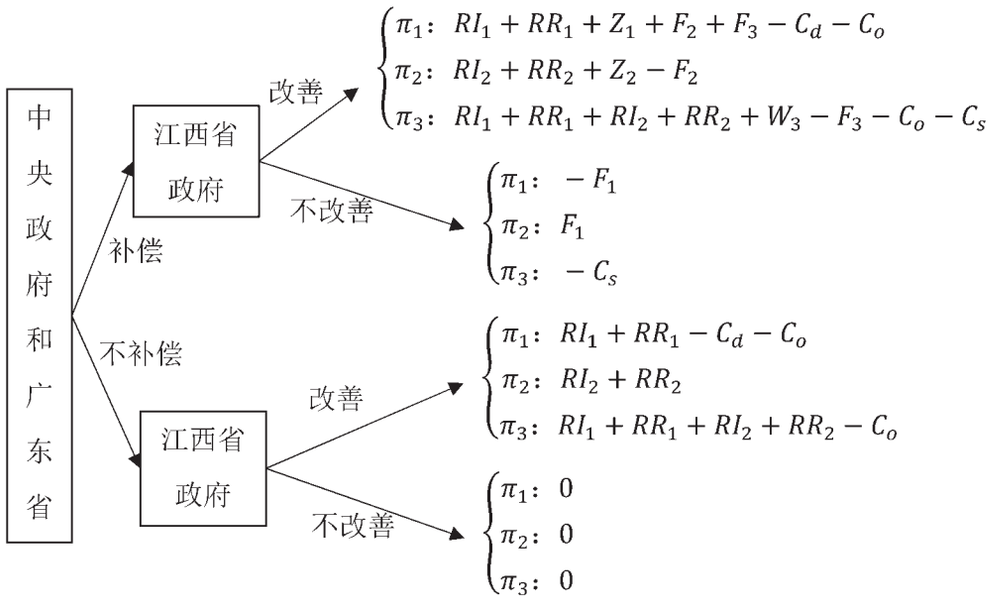


图2　政府间序贯博弈的博弈树

2.政府间序贯博弈分析

情景1：中央政府和广东省政府不实行补偿。此时，江西省政府是否改善水质取决于$RI_1+RR_1-C_d-C_o$是否为正。作为东江源区，赣州矿产资源丰富、传统农业和养殖条件具备，矿产开发、畜禽养殖等污染产业经济比重大，改善水质需付出的机会成本$C_o$高，而经济收益$RI_1$小。同时，赣州及其周边贫困地区较多，当地居民更关心就业和收入提高，水质改善产生的社会收益$RR_1$有限。再考虑不菲的水污染治理费用$C_d$，有$RI_1+RR_1-C_d-C_o<0$，故江西省政府选择不改善水质策略。

对广东省政府而言，东江肩负着河源、惠州、东莞、广州、深圳近3000万人口的生产生活用水，供给多家饮用水企业，且由于经济发展好、收入水平高，当地居民对水质提升的期望较大，故上游水质改善的经济收益$RI_2$和社会收益$RR_2$显著，广东省政府显然希望江西省提升水质。

对中央政府而言，尽管近年来东江上游地区经济发展不断加快，GDP年增长率达到9%，但流域内95% GDP仍集中在下游广东省境内，水环境改善带来的广东省收益增加大于江西省收益损失，即$RI_2+RR_2>C_o-RI_1-RR_1$，则中央政府也希望江西省改善水质。

可见，无生态补偿时“不补偿、不改善”是子博弈纳什均衡解，江西省政府将选择不改善水质，而中央政府和广东省政府无法获得生态收益。

情景2：中央政府和广东省政府实行补偿。由图2易知，当$RI_1+RR_1+Z_1+F_1+F_2+F_3>C_d+C_o$时，江西省政府会选择改善水质并使之达标。在江西省当前发展水平、经济社会结构不变的情况下，$C_d+C_o-RI_1-RR_1$一定且小于零，则补偿金总额$F_1+F_2+F_3$越高、政治收益$Z_1$越大，江西省政府越愿意改善水质。若中央政府对江西省是否推进流域水环境改善的政治考评足够严格，$Z_1$足够大，即使补偿金远不足以弥补提升水质造成的经济损失，江西省政府也会采取改善水质的策略。

对中央政府和广东省政府而言，相比“不补偿、不改善”的子博弈纳什均衡，“补偿、不改善”策略下二者收益分别减少$C_s$、增加$F_1$。若预知江西省不改善水质，中央政府不会参与生态补偿以节省监管成本$C_s$；而在中国水资源公有且无中央政府监管的情况下，广东省也难得到江西省因不良水质支付的补

偿金$F_1$，博弈的最终结果是“不补偿、不改善”。

若“补偿、改善”是博弈结果，要求该策略下江西省政府收益大于“补偿、不改善”的收益，而广东省和中央政府收益大于“不补偿、不改善”的收益，即补偿金总额$F_1+F_2+F_3$高于江西省改善水质的净损失，广东省支付补偿金$F_2$低于其政治、经济、社会收益，中央政府提供奖励金$F_3$低于其政治净收益和江广两省经济社会净收益，如式(5)所示。

$$\begin{cases} C_d+C_0-RI_1-RR_1-Z_1<F_1+F_2+F_3 \\ Z_2+RI_2+RR_2>F_2 \\ RI_2+RR_1+RI_2+RR_2+W_3-C_S-C_0>F_3 \end{cases} \tag{5}$$

但在现实中，各政府在决策前难以完全了解对方乃至自身的损益信息，博弈各方在当期确定合理补偿金额并做出符合自身利益最大化的策略选择存在一定的困难。这意味着，横向生态补偿的政府间博弈和协议签订会进行很多轮，每期决策时补偿方和受补偿方将根据有限的信息和先前的损益经验做出判断，不断调整自己的补偿金额和策略选择，直至达到稳定均衡。

3.政府间演化博弈分析

在演化博弈论中，行为主体是有限理性的，无法在经济活动的瞬间实现最优结果。随着时间的发展，主体的行为策略不断修正改进，成功的策略被模仿，行动的标准逐渐明确，最终实现长期最优化决策。因此，在自身和对方的成本收益信息不明确的情况下，政府间演化博弈模型可以更贴合实际地对东江流域横向生态补偿协议能否持续签订、东江上游水质能否持续改善进行评价。

演化博弈模型的构建。假设中央政府、广东省政府、江西省政府是有限理性的。参数$x$、$y$分别为江西省政府采取改善水质策略的概率、广东和中央政府采取生态补偿策略的概率，$x$、$y$随时间$t$不断变化，且$0\leqslant x\leqslant 1$，$0\leqslant y\leqslant 1$。根据图2，得到江西省政府采取改善、不改善水质策略的期望收益$\pi_{11}$、$\pi_{12}$，以及平均期望收益$\overline{\pi}_1$：

$$\pi_{11}=y\times(RI_1+RR_1+Z_1+F_2+F_3-C_d-C_o)+(1-y)\times(RI_1+RR_1-C_d-C_o) \tag{6}$$

$$\pi_{12}=y\times(-F_1) \tag{7}$$

$$\overline{\pi}_1=x\times\pi_{11}+(1-x)\times\pi_{12}=x\times(RI_1+RR_1-C_d-C_o)+xy\times(Z_1+F_2+F_3)-y(1-x)\times F_1 \tag{8}$$

广东和中央政府作为补偿方整体采取补偿和不补偿策略的期望收益$\pi_{s1}$、$\pi_{s2}$，以及平均期望收益$\overline{\pi}_s$：

$$\pi_{s1}=x\times(RI_2+RR_2+Z_2-F_2+RI_1+RR_1+RI_2+RR_2+W_3-F_3-C_o-C_s)+(1-x)\times(F_1-C_s) \tag{9}$$

$$\pi_{s2}=x\times(RI_2+RR_2+RI_1+RR_1+RI_2+RR_2-C_o) \tag{10}$$

$$\overline{\pi}_s=y\times\pi_{s1}+(1-y)\times\pi_{s2}=x\times(RI_1+RR_1+2\times RI_2+2\times RR_2-C_o)+y\times(F_1-C_s)+xy\times(Z_2+W_3-F_1-F_2-F_3) \tag{11}$$

复制动态方程与演化稳定策略。根据式(6)-式(11)，江西省政府和补偿方整体的复制动态方程$G(x)$、$G(y)$分别为：

$$G(x)=\mathrm{d}x/\mathrm{d}t=x\times(\pi_{11}-\overline{\pi}_1)=x^*(1-x)^*(RI_1+RR_1-C_d-C_o+y^*Z_1+y^*F_1+y^*F_2+y^*F_3) \tag{12}$$

$$G(y)=\mathrm{d}y/\mathrm{d}t=y\times(\pi_{s1}-\pi_s)=y^*(1-y)^*(x^*Z_2+x^*W_3-x^*F_2-x^*F_3+(1-x)^*F_1-C_s) \tag{13}$$

当博弈实现长期最优决策，即演化稳定策略时，$G(x)$、$G(y)$值均为0。

$$\begin{cases} G(x)=x\times(1-x)\times(RI_1+RR_1-C_d-C_o+y^*Z_1+y\times F_1+y\times F_2+y\times F_3)=0 \\ G(y)=y\times(1-y)\times(x\times Z_2+x\times W_3-x\times F_2-x\times F_3+(1-x)\times F_1-C_s)=0 \end{cases} \tag{14}$$

易知，方程组(14)有5个局部均衡点：(0,0)、(1,0)、(0,1)、(1,1)和$(x^*,y^*)$，其中$x^*=(C_s-F_1)/(Z_2+W_3-F_1-F_2-F_3)$，$y^*=(C_d+C_o-RI_1-RR_1)/(Z_1+F_1+F_2+F_3)$。根据弗里德曼(1998)的演化博弈理论，演化稳定策略需严格满足纯策略纳什均衡，而$(x^*,y^*)$是混合策略纳什均衡，故排除。为检

$$J=\begin{bmatrix} \dfrac{\partial G(x)}{\partial x} & \dfrac{\partial G(x)}{\partial y} \\ \dfrac{\partial G(y)}{\partial x} & \dfrac{\partial G(y)}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$=\begin{bmatrix} (1-2x)[RI_1+RR_1-C_d-C_o+y\times(Z_1+F_1+F_2+F_3)] & x(1-x)(Z_1+F_1+F_2+F_3) \\ y(1-y)(Z_2+W_3-F_1-F_2-F_3) & (1-2y)[F_1-C_s+x\times(Z_2+W_3-F_1-F_2-F_3)] \end{bmatrix}$$

验其余四个局部均衡点的系统稳定状态，构建雅可比矩阵$J$如式(15)。根据利亚普诺夫(1998)系统稳定性理论，当系统稳定时，矩阵所有特征值都小于或等于零，且等于0的特征值没有多个根。

若“补偿、改善”是演化稳定策略，则系统在局部均衡点(1, 1)是稳定的，$J_{(1,1)}$的特征值$C_d+C_o-RI_1-RR_1-Z_1-F_1-F_2-F_3$和$C_s+F_2+F_3-Z_2-W_3$均非正数，且不同时为零，即

$$\begin{cases} RI_1+RR_1+Z_1+F_1+F_2+F_3-C_d-C_o>0 \\ Z_2+W_3-C_s\geqslant F_2+F_3 \end{cases} \tag{16}$$

或

$$\begin{cases} RI_1+RR_1+Z_1+F_1+F_2+F_3-C_d-C_o\geqslant 0 \\ Z_2+W_3-C_s> F_2+F_3 \end{cases} \tag{17}$$

可见，演化博弈长期稳定在中央和广东省政府实行生态补偿、江西省政府改善水质的策略组合的条件是，江西省获得的补偿金$F_1+F_2+F_3$大于改善水质损失$C_d+C_o-RI_1-RR_1-Z_1$，且广东省和中央政府提供的补偿金$F_2+F_3$不低于其政治净收益$Z_2+W_3-C_s$。

相比完全信息动态博弈模型，政府间演化博弈结果强调了中央政府推进东江流域生态文明建设的政治意愿对流域水质持续改善的重要作用。在长期最优决策中，相比水质改善的经济社会收益，政治因素才是决定中央政府和广东省政府补偿金额度的关键。只有当$W_3$较大时，中央政府才愿意付出监管成本并提供奖励金以推动横向生态补偿协议的签订和执行；而只有当中央政府参与补偿协议并对广东省政府施以严格的政治考评时，广东省政府才愿意对江西省改善水质的损失进行补偿。

因此，在江西省$RI_1$、$RR_1$、$C_d$、$C_o$一定的情况下，中央政府的政治意愿和对两省政府政治考评的强度限制着生态补偿金的额度，进而决定着东江流域横向生态补偿和水质提升能否持续发展下去。一旦中央政府意愿降低，横向生态补偿将难以为继。

## 四、考虑两省企业和个人的博弈分析

在东江上游水质改善的过程中，企业和个人作为第三层级利益相关方，其得失损益不一。在江西，矿产、畜禽养殖等污染产业发展受到限制，相关企业损失经济利润、相关个人损失收入和就业机会；相反，旅游业等依赖良好生态环境的产业收益提升，既不排放污染也不依赖水质的清洁产业收益不变。在广东，饮用水等生态依赖产业收益增加，相关企业和个人获得更多的经济利润、个人收入和就业机会；电镀、漂染等污染产业也可能因入省水质改善、省内减排要求放松而得到一定发展；清洁产业则不受水质变化影响。

现行生态补偿模式中，两省政府作为博弈参与主体，主要考虑水质改善对自身政治收益和全省经济社会整体的影响，但对不同类型企业和个人收益变动的关注不足。例如，江西省将全部补偿金用于生态环境治理工程，忽略了对污染产业减排损失的补偿；广东省补偿金全部由政府支付，而获益明显的生态依赖产业没有分担费用。生态补偿“谁受益谁补偿”“谁受损补偿谁”的原则在第三层级利益相关方中没有得到很好体现。因此，考虑江西、广东两省企业和个人在横向生态补偿中的利益得失，有利于生态补偿金的合理征收和分配使用，有助于江西省补偿污染产业损失，广东省减轻政府支付压力，促进东江流域横向生态补偿的长久实施和水质的持续改善。

1.考虑企业和个人的博弈模型构建

基本假设。政府间博弈模型中，两省支付函数由水质改善产生的经济、社会、政治收益和机会成本、治理成本等变量组成。在考虑企业和个人的博弈模型中，假定两省效用由各自经济部门产值和水质提升带来的政府部门收益组成。经济部门有污染、清洁、生态依赖三种产业，企业利润、个人收入和就业等第三层级相关方的利益得失由其所属产业的产值增减反映。水质提升的机会成本和经济收益分别体现为污染产业和生态依赖产业的产值变动，而社会收益、政治收益和水污染治理成本归为政府部门的效用变动。江西省和广东省作为两个理性经济主体，其决策追求自身效用最大化，理想状态下两省对另一方的信息了解是完全的。

效用函数设定。参考王奇等人(2014)和李明全等人(2016)的研究，设定两省效用函数。假定经济发展、水质提升带来的效用均满足边际效用递减规律，采用对数形式的效用函数，则各省效用函数表达式为：

$$U_i = \ln(Y_i) + Z_i \times \ln(Q_i) \tag{18}$$

式中：$Y_i$，$Q_i$，$Z_i$分别表示$i$省份的经济部门产值、水体质量和对政府部门收益的偏好程度。

假定经济部门产值与污染排放和水体质量之间为线性关系，有：

$$Y_i = p_i E_i + g_i + d_i Q_i \tag{19}$$

式中：$E_i$为$i$省份的污染排放量；$p_i$为$i$省份污染产业单位污染物排放产出；$g_i$为$i$省份清洁产业产出；$d_i$为$i$省份生态依赖产业单位水质提升产出。

假定水体质量与污染排放量呈反向线性关系，有：

$$Q_i = E_i^c - [\beta_i \times E_i + (1-\beta_j) \times E_j] \tag{20}$$

式中：$E_i^c$为$i$省份水体污染承受阈值，$0 \leqslant \beta_i \leqslant 1$为$i$省份排放的水体污染物滞留在本省的比例；$j$为另一省份，$E_j$为$j$省份的污染排放量，$(1-\beta_j)$为$j$省排放的水体污染物传输到$i$省的比例；假定$Q_i > 0$。

又因江西省位于东江流域上游，广东省处于下游，江西省排放的水体污染物部分地传输到广东，而广东省污染排放不会传输至江西。故江西省效用函数$U_1$、广东省效用函数$U_2$分别为：

$$U_1 = \ln[p_1 \times E_1 + g_1 + d_1 \times (E_1^c - \beta_1 \times E_1)] + Z_1 \times \ln(E_1^c - \beta_1 \times E_1) \tag{21}$$

$$U_2 = \ln[p_2 \times E_2 + g_2 + d_2 \times (E_2^c - (1-\beta_1) \times E_1 - E_2)] + Z_2 \times \ln[E_2^c - (1-\beta_1) \times E_1 - E_2] \tag{22}$$

根据一阶条件 $\frac{\partial U_1}{\partial E_1} = 0$，$\frac{\partial U_2}{\partial E_2} = 0$，可得无生态补偿协议时江广两省的均衡排放量$E_1^*$、$E_2^*$：

$$\begin{cases} E_1^* = \dfrac{(p_1 - \beta_1 d_1 - \beta_1 d_1 Z_1) E_1^c - \beta_1 g_1 Z_1}{\beta_1 (p_1 - \beta_1 d_1)(Z_1 + 1)} \\ E_2^* = \dfrac{(p_2 - d_2 - d_2 Z_2)[E_2^c - (1-\beta_1) E_1^*] - g_2 Z_2}{(p_2 - d_2)(Z_2 + 1)} \end{cases} \tag{23}$$

当补偿协议达成时，江西省改善水质的临界条件是江西省效用损失等于补偿金总额$F_s$，广东省支付补偿金的临界条件是广东省效用增加等于其支付额度$F_2$，若此时江西、广东的最优排放量分别为$E_1^{**}$、$E_2^{**}$，则补偿协议实施前后两省的效用变化有：

$$\Delta U_1 = U_1(E_1^{**}) - U_1(E_1^*) = -F_s \tag{24}$$

$$\Delta U_2 = U_2(E_2^{**}) - U_2(E_2^*) = F_2 \tag{25}$$

2.江西省利益分析与补偿金分配

对江西省而言，经济收益是影响其是否选择改善水质策略的重要因素。为简化分析，假设江西省没有政府利益偏好即$Z_1 = 1$；污染滞留比例$\beta_1 = 0.5$，污染承受阈值$E_1^c$为常数；生态依赖产业产出系数$d_1 = 1$，污染产业产出系数$p_1 = n$，清洁产业产出$g_1 = \lambda$，$n$和$\lambda$均为正值；则均衡时江西省排放量$E_1^*$、$E_1^{**}$及其变化值$\Delta E_1$和总效用$U_1^{**}$分别为：

$$\begin{cases} E_1^* = \dfrac{(n-1)E_1^c - 0.5\lambda}{n-0.5} \\ E_1^{**} = \dfrac{(n-1)E_1^c - 0.5\lambda - (nE_1^c + 0.5\lambda)\sqrt{1-e^{-Fs}}}{n-0.5} \\ \Delta E_1 = -\dfrac{(nE_1^c + 0.5\lambda)\sqrt{1-e^{-Fs}}}{n-0.5} \\ U_1^{**} = \ln\left(\dfrac{(nE_1^c + 0.5\lambda)^2}{2n-1} e^{-Fs}\right) \end{cases} \tag{26}$$

分析1：产业结构对江西省总效用的影响。在补偿金总额一定，即$\Delta U_1$一定的情况下，江西省履行生态补偿协议时总效用$U_1^{**}$的高低是影响其提升水质的能力和意愿的关键因素。

当只有清洁产业产出$\lambda$变动时，$U_1^{**}$随$\lambda$的增加而增加，且$E_1^{**}$是$\lambda$的减函数，$-\Delta E_1$是$\lambda$的增函数。这是由于$\lambda$的增加使得污染产业比重降低、江西省经济部门产值和总效用对污染产业产出的依赖被削弱，在补偿金一定的情况下，江西省愿意适当加大减排量，以污染产业产值损失换取更明显的水质提升及其带来的生态依赖产业收益、政府部门效用和总效用的增大。因此，增加清洁产业产出有利于降低江西省污染排放量，提高生态补偿协议下江西省的总效用。

当只有单位排放产出$n$变动时：

(a)若$n \leqslant 1 + \frac{0.5\lambda}{E_1^c}$，则$E_1^*=0$，即单位污染产出小于单位减排产出时，江西省不会自发排放任何污染；

(b)若 $1 + \frac{0.5\lambda}{E_1^c} < n \leqslant \frac{E_1^c + 0.5\lambda(1+\sqrt{1-e^{-Fs}})}{(1-\sqrt{1-e^{-Fs}})E_1^c}$，则$E_1^*>0$，$E_1^{**}=0$，即单位污染产出有限时，江西省愿意停止全部污染产业生产以换取较高补偿金；

(c)若 $n > \frac{E_1^c + 0.5\lambda\left(1+\sqrt{1-e^{-Fs}}\right)}{(1-\sqrt{1-e^{-Fs}})E_1^c}$，则 $E_1^* > E_1^{**} > 0$，总效用$U_1^{**}$随$n$的增加而增加，而减排量$-\Delta E_1$是$n$的减函数，即单位污染产出提高时，江西省能以更小的减排量获得相同补偿金和更大的经济产值及总效用。

当江西省污染排放不为零时，尽管$n$增加会增大污染产业减排的机会成本，但由于减排前污染产业产值$Y_1^{p*}$随$n$的增长更显著，故减排后产值$Y_1^{p**}$也

比$n$较小时的产值更高。无论对污染产业还是江西省整体而言，增加实际得到的产值远比减小机会成本更重要，能获得的效用也更高。

因此，江西省应注重污染产业转型升级，提高生产技术水平，增大单位污染产出，推动高污染低产出产业转为低污染高产出产业，从而在补偿金一定的情况下，有效提升本省经济产值和总效用。

分析产业结构对补偿金总额的影响。当补偿金$F_s$变化时，江西省减排量$-\Delta E_1$是$F_s$的增函数，而总效用U_1^(**)因随减排量增加而减少，成为$F_s$的减函数，如图3所示。在单位污染产出$n$和清洁产业产出λ一定时，使排放量$E_1^{**}=0$的补偿金$F_s^{\theta}$是江西省可能获得的最高补偿额，$F_s^{\theta}$对应的减排量是江西省最大减排阈值$-\Delta E_1^{max}$。

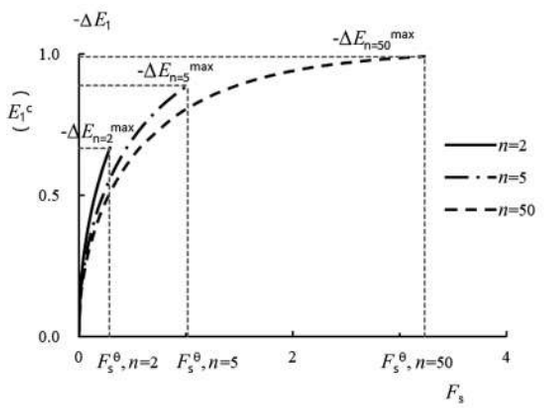


图3（$a$）

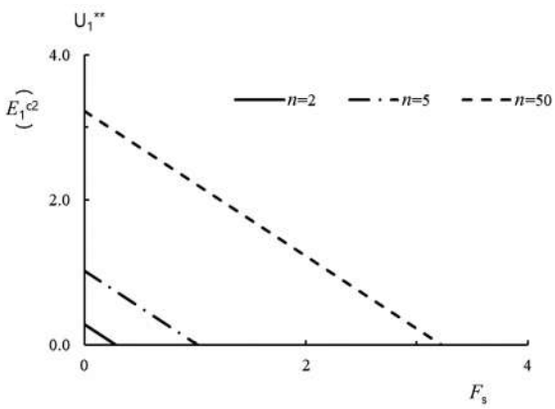


图3（$b$）

图3　补偿金额和单位污染产出对江西省减排量及总效用的影响

当单位污染产出$n$增加时，较小的污染排放即可带来较高的经济产值，相同减排量下江西省的经济损失增加、需要的补偿金增多，但相同效用下江西省排放量减少、减排潜力$-\Delta E_1^{max}$增大。更重要的是，在相同水质目标下，排放量$E_1^{**}$相同，$n$增加使得江西省总效用$U_1^{**}$增加，若无生态补偿时江西省总效用$U_1^{*}$一定，则改善水质的效用损失得到有效降低，江西省对补偿金$F_s$的需求减小。

当清洁产业产出λ增加时，由前文分析可知，江西省排放量$E_1^{**}$降低、总效用$U_1^{**}$增加，此时较少补偿金$F_s$就能使江西省排放量和总效用达到相同水平。

可见，江西省调整产业结构、推动污染产业转型升级，减小经济发展对污染排放的依赖，有利于提高自身减排潜力，降低改善水质行为对补偿金额的要求，缓解补偿方财政压力，最终在生态补偿政策的引导和帮助下实现自发控制污染、追求水质提升的生态环境友好发展模式。因此，江西省在投资治理工程项目的同时，应将部分生态补偿金用于污染产业技术水平升级和产业结构调整，增加低污染排放的经济效用，提高自身减排意愿和潜力，降低对补偿金的依赖，促进东江水质的持续改善。

3.广东省利益分析与补偿金分担

由政府间博弈分析可知，政治收益是影响广东省愿意支付补偿金多少的重要因素，因而在简化分析时假设广东省政府利益偏好$Z_2=k$，污染产业单位排放的产出$p_2=m$，清洁产业产出$g_2=\mu$，生态依赖产业单位水质提升的产出$d_2=1$，污染承受阈值$E_2^c$为常数；则广东省排放量变化$\Delta E_2$、污染产业产值变化$\Delta Y_2^p$、生态依赖产业产值变化$\Delta Y_2^d$、经济部门效用变化$\Delta U_2^Y$、政府部门效用变化$\Delta U_2^Z$有：

$$\begin{cases}\Delta E_2=\dfrac{0.5(m-k-1)(E_1^*-E_1^{**})}{(m-1)(k+1)}\\ \Delta Y_2^p=\dfrac{0.5m(m-k-1)(E_1^*-E_1^{**})}{(m-1)(k+1)}\\ \Delta Y_2^d=\dfrac{0.5mk(E_1^*-E_1^{**})}{(m-1)(k+1)}\\ \Delta U_2^Z=k\times\Delta U_2^Y\end{cases}\tag{27}$$

分析1：广东省补偿金及影响因素。依据效用最大化条件$\Delta U_2=F_2$，考察广东省愿意支付的补偿额$F_2$及其影响因素。若江西省和广东省具有相同的环境容量，即$E_1^c=E_2^c$，则效用最大化条件可化简为：

$$F_2=(1+k)\ln\left(1+\frac{\sqrt{1-e^{-Fs}}}{\frac{\mu(2n-1)}{m(nE_1^c+0.5\lambda)}+1}\right)\tag{28}$$

其中$F_s=F_1+F_2+F_3$，$F_1$为东江跨省水质不达标时江西省需支付给广东的补偿金，$F_2$、$F_3$分别为跨省水质达标时广东省和中央政府支付给江西的补偿金。

由式(28)可知,广东省支付补偿金$F_2$随各影响因素变化的趋势:一是广东省政治偏好$k$越大,越重视上游水质改善带来的政府部门收益,相同水质变化时总效用增加值越大,则愿意支付$F_2$更多;二是中央政府出资$F_3$越高,意味着中央政府推进东江水质改善的政治意愿越强,广东省与中央保持一致、激励江西省提升水质能获得的政治收益越多,则广东省愿意支付$F_2$越高;三是广东省单位污染产出$m$越大或清洁产业产出$\mu$越小导致污染产业比重越大时,其单位污染减排造成的经济和效用损失越大,在水质目标一定的情况下,广东省愿意支付更多$F_2$以激励单位污染产出低、减排机会成本相对小的江西省进一步提升跨省水质,为广东省高产出污染产业的发展提供更大空间,避免自身减排所需的高额机会成本;四是江西省单位污染产出$n$越大或清洁产业产出$\lambda$越大导致污染产业比重越小时,江西省得到相同效用所需的污染排放越少,则一定水质改善目标下,广东省需支付补偿$F_2$越少。

分析2:广东省补偿金的分担。按照"谁受益谁补偿"的原则,在上游水质改善中获益的部门及产业应共同承担支付补偿金的责任,若按收益比例分担补偿金,则在不同单位污染产出$m$和政治偏好$k$下,广东省补偿金的分担可考虑如下形式:对政府部门而言,无论单位污染产出$m$如何变化,政府部门在水质改善中获得的效用$U_2^Z$均为经济部门效用$\Delta U_2^Y$的$k$倍,故政府部门和经济部门应分别承担补偿金的$\frac{k}{k+1}$和$\frac{1}{k+1}$。对经济部门三种产业而言,随着上游水质改善,生态依赖产业产值提高,清洁产业产值不变,污染产业产值变化与政治偏好和单位污染产出的相对大小有关。

当$m \leqslant 1$,即单位排放产出不高于单位减排产出时,广东省最优排放量$E_2^*=E_2^{**}=0$,此时污染产业产值和变化量均为零,生态依赖产业作为经济部门唯一受益产业应承担全部经济部门补偿金$\frac{F_2}{k+1}$。

当$m>1$时,单位污染排放增加经济部门产值、减少政府部门收益,则广东省排放量变化$\Delta E_2$和污染产业产值变化$\Delta Y_2^p$受政治偏好$k$影响:

(a)若$k<\frac{(m-1)(E_1^C-0.5E_1^{**})}{\mu+E_1^C-0.5E_1^{**}}$,即政治偏好较小时,$\Delta E_2>0$,广东因上游水质改善而放松对本省污染排放的限制,此时污染产业和生态依赖产业均受益,应分别承担经济部门补偿金的$\frac{m-k-1}{m-1}$、$\frac{k}{m-1}$;

(b)若$k \geqslant \frac{(m-1)(E_1^C-0.5E_1^{**})}{\mu+E_1^C-0.5E_1^{**}}$,即政治偏好较大时,$\Delta E_2 \leqslant 0$,广东省不会因入省水质改善增加自身污染排放,污染产业产值不会增加,则生态依赖产业应承担经济部门所有补偿金。

作为参考,图4给出了$m=2$,$\mu=0$时,广东省排放量变动$\Delta E_2$、污染产业产值变动$\Delta Y_2^p$和生态依赖产业产值变动$\Delta Y_2^d$随政治偏好$k$的变化趋势,图中使得污染产业产值增加的政治偏好临界值为$k=1$。

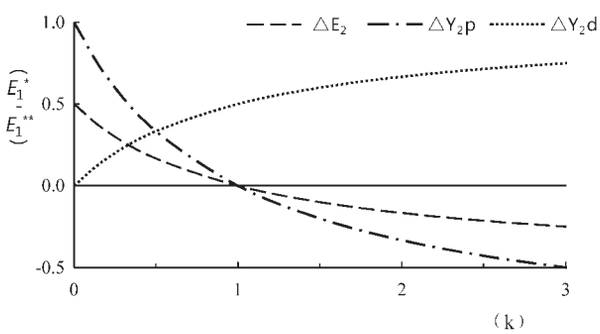


图4 政治偏好对广东省污染排放和经济产值变动的影响($m=2$,$\mu=0$)。

上述分析可见,广东省政治偏好$k$越大,水质改善带来的总效用变化越大、政府部门收益越高,则广东省愿意支付的补偿金$F_2$越高,政府部门应承担的补偿金比例越高。当单位污染产出$m$越大时,广东省减排机会成本越大,在既定水质目标下,广东省愿意支付更多补偿金$F_2$激励高污染低产出的江西省进一步改善跨省水质,从而减轻广东自身减排压力、利于本省高产出污染产业发展。因此,广东省单位污染产出越大,其愿意支付的补偿金$F_2$越高,污染产业收益越多,此时污染产业应承担的补偿金比例升高,而生态依赖产业分担的补偿金比例降低。

## 五、政策建议

结合上述分析,对东江流域横向生态补偿的可持续发展提出以下政策建议。

第一,江西省应重视对污染产业减排损失的补偿,将部分生态补偿金用于污染产业的转型升级和江西省的产业结构调整。在补偿金额有限的情况下,通过提高污染产业技术水平、增大单位污染产出、降低高污染产业比重,减小经济发展对污染排放的依赖,提高本省减排潜力,保障东江水质的持

续改善。

第二，广东省应动员因上游水质改善而获益的产业分担部分补偿金，缓解政府财政压力，提高全省补偿能力。同时，应探索多种补偿形式，充分发挥先进产业和人才技术优势，帮助江西省加快调整产业结构、开发产业潜力，降低江西省水质改善成本，从而降低其对补偿金的需求。

第三，中央政府应督促江西广东两省建立健全信息渠道，全面、准确、及时地掌握各级利益相关方的诉求，以避免信息不完全对横向生态补偿机制有效性的负面影响，促进横向生态补偿方式、补偿金额以及落实措施的合理化，促进江西和广东社会经济的可持续发展。

## 参考文献

[1]杨中茂，许健，谢国华.东江流域上下游横向生态补偿的必要性与实施进展[J].环境保护，2017(7).

[2]孙治仁.东江水源区生态补偿机制研究[D].广州：华南理工大学，2017.

[3]高振斌，王小莉，苏婧，等.基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究[J].生态与农村环境学报，2018(6).

[4]卢志文.省际流域横向生态保护补偿机制研究[J].发展研究，2018(7).

[5]张捷，莫扬."科斯范式"与"庇古范式"可以融合吗？——中国跨省流域横向生态补偿试点的制度分析[J].制度经济学研究，2018(3).

[6]王奇，吴华峰，李明全.基于博弈分析的区域环境合作及收益分配研究[J].中国人口·资源与环境，2014，24(10).

[7]李明全，王奇.基于双主体博弈的地方政府任期对区域环境合作稳定性影响研究[J].中国人口·资源与环境，2016，26(3).

[8]Daniel Friedman.On economic applications of evolutionary game theory[J]. Journal of Evolutionary Economics，1998，8(1).

[9]P.K.C. Wang. Stability analysis of elastic and aeroelastic systems via Lyapunov's direct method[J]. Journal of the Franklin Institute，1966，281.

# Research on the Sustainability of Horizontal Ecological Compensation in Dongjiang River Basin from the Perspective of Game

Liu Huifang　Wu Xinyi

**Abstract:** In the three years since the implementation of the horizontal ecological compensation policy in the Dongjiang River Basin, some results have been achieved while there are still some problems. The dynamic information and evolutionary game methods of complete information are used to study the gains and losses tradeoffs, strategic choices and game outcomes of stakeholders in the horizontal ecological compensation of the Dongjiang River Basin. Research shows that the central government's funding and supervision have a significant impact on the implementation of horizontal ecological compensation. The increase in compensation and strict political evaluation are conducive to the improvement of water quality in the Jiangxi provincial government, and the level of political evaluation income is that Guangdong is willing to pay compensation Decisive factor. The study further focused on the influence of enterprises and individuals in Jiangxi and Guangdong as stakeholders on the outcome of the game. The results show that Jiangxi Province will use part of the ecological compensation for the transformation and upgrading of local polluting industries, and Guangdong Province will levy part of the ecological compensation from the province's polluting industries and ecologically dependent industries, which will be conducive to the sustainable development of horizontal ecological compensation.

**Key Words:** Dongjiang River Basin; Horizontal Ecological Compensation; Dynamic Game; Evolutionary Game

（责任编辑：晓　力）