

跨流域调水工程生态补偿策略的演化博弈分析

彭 益, 李 永*, 张泽宇, 犹鸿森

四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2025年5月8日; 录用日期: 2025年6月4日; 发布日期: 2025年8月26日

摘 要

南水北调西线工程是构成我国国家水网“四横三纵”的重要组成部分, 而西线调水对长江流域的生态发展势必产生一定的影响。为进一步研究生态补偿机制在西线工程中的作用, 本文引入生态补偿机制和激励惩罚约束机制, 构建流域管理者为博弈主体的两方演化博弈模型, 并对演化博弈进行了数值模拟仿真分析, 结果表明: 1) 无论是激励手段还是惩罚手段, 都会对演化博弈系统的稳定性产生影响。2) 博弈主体的策略选择结果与额外生态收益、付出成本等因素具有较强的相关性。该研究成果可为进一步开展南水北调西线工程的生态补偿机制研究提供技术参考与建议。

关键词

南水北调西线工程, 跨流域调水, 生态补偿, 演化博弈模型, 仿真分析

Evolutionary Game Analysis of Ecological Compensation Strategies for Inter-Basin Water Diversion Projects

Yi Peng, Yong Li*, Zeyu Zhang, Hongsen You

State Key Laboratory of Hydraulics & Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Received: May 8th, 2025; accepted: Jun. 4th, 2025; published: Aug. 26th, 2025

Abstract

The Western route of the South-to-North Water Diversion project constitutes a crucial component of China's national water network, known as the “four horizontal and three vertical” system. The diversion

作者简介: 李永(1969-), 男, 研究员, 博士学历, 研究方向为水力学及河流动力学。

*通讯作者 Email: lysccd@163.com

of water from this route will inevitably have a significant impact on the ecological development of the Yangtze River basin. To further investigate the role of a payment for ecosystem services mechanism in the Western Route project, this paper introduces an ecological compensation mechanism along with incentive, punishment, and constraint mechanisms implemented. Additionally, it constructs a two-party evolutionary game model wherein managers. Numerical simulation and analysis are conducted to examine this evolutionary game. The results demonstrate that: 1) Both incentives and punishments influence stability within the evolutionary game system; 2) There is a strong correlation between strategy choices made by game players and additional ecological benefits and costs incurred. These research findings can serve as technical references and provide suggestions for further exploration into a payment for ecosystem services mechanism for the western route of South-to-North Water Diversion project.

Keywords

South-to-North Water Diversion Project, Inter-Basin Water Transfer, Payment for Ecosystem Services, Evolutionary Game Model, Simulation Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

南水北调西线工程是我国一大型跨流域调水工程,是解决黄河流域资源性缺水问题的治本之策[1]。其中生态补偿是生态保护的一种有效经济手段[2][3]。如何协调长江、黄河流域所涉及到的利益冲突,实现生态与经济的可持续发展是南水北调西线工程的一大重要论题。

生态补偿是实现流域间可持续发展的主要手段,是以补偿生态服务价值来进行保护流域生态系统的一种机制[4]。南水北调西线工程作为协调流域水资源时空分布不均的大型水利工程,其运行需要综合环境保护、可持续发展与资源之间的关系。如何使用生态补偿机制来协调生态环境保护与经济发展的平衡,已成为跨流域调水工程可持续发展的重要议题。孙玉环等[5]从水质水量的视角建立了水源区与受水区之间的生态补偿标准;李继清等[6]针对南水北调中线工程中的受水区,运用费用分析法计算出其生态补偿标准;Peng Zhuoyue等[7]从碳中和的视角出发,基于贝叶斯网络模型提供了可供参考的生态补偿激励机制政策;骆进仁等[8]采用非合作静态博弈方法,将博弈主体抽象为上、下游流域后进行推演,为生态补偿约束机制提出了建议;周申蓓等[9]基于 Shapley 值法构建了成本与利益均衡考虑的跨流域调水工程的横向生态补偿标准。

演化博弈论作为博弈论逐渐演变得到的一大分支,近年来被国内外学者广泛使用在流域生态补偿研究上。Lu Yali 等[10]构建了地方政府间协同治理机制的演化博弈模型,为黄河流域生态补偿的发展提供了新思路;康艳青等[11]基于成本分担模型构建了流域上下游政府协同治理的两方演化博弈模型,提出了推进生态补偿可持续发展的建议;席猛[12]等构建了三方演化博弈模型并进行了模拟仿真分析,为黄河流域的生态补偿建设提供了可行性建议;刘林玲等[13]从多个角度构建调水区、受水区与上级主管部门的三方演化博弈模型并进行分析,提出跨流域调水工程生态补偿的可持续发展建议。

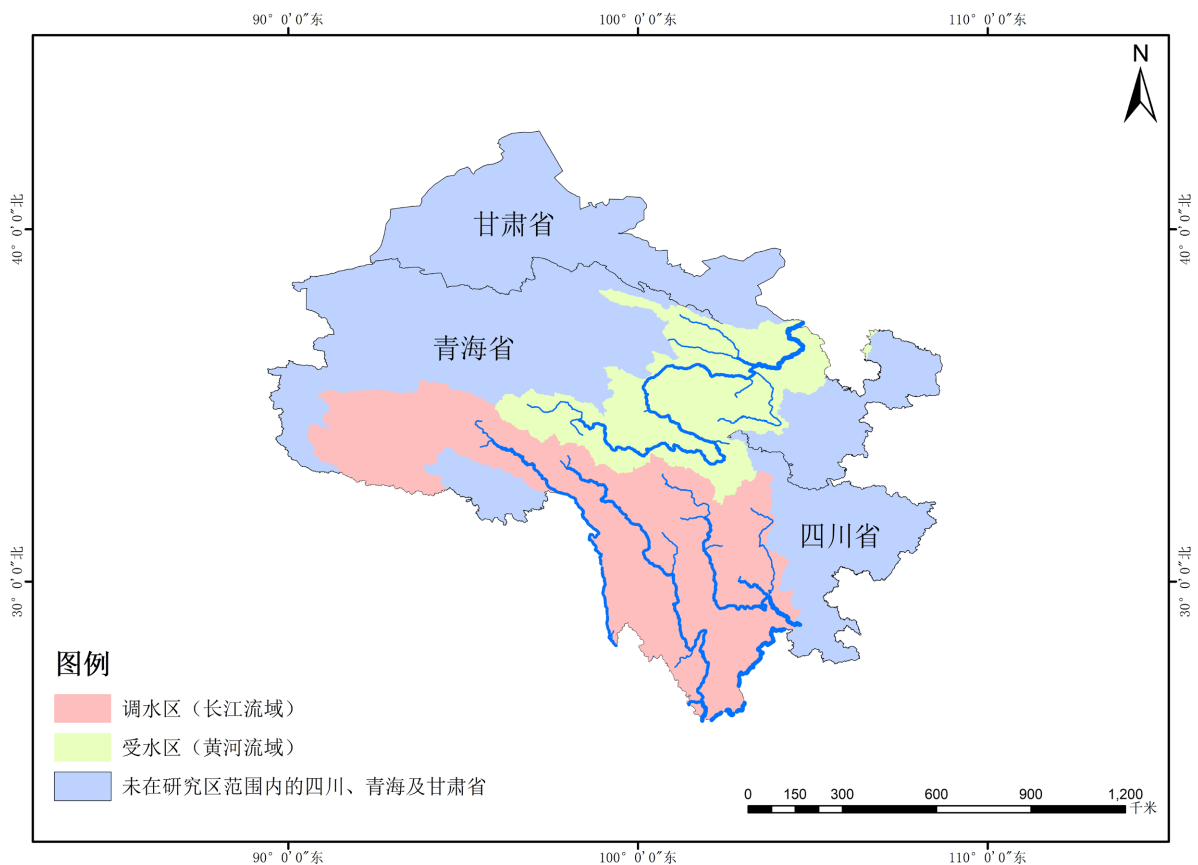
本文构建南水北调西线工程跨流域生态补偿演化博弈模型,以管理者为博弈主体,引入激励惩罚约束机制,分析各博弈主体的策略选择的演化过程,并进行模拟仿真分析。本文的主要目标是以南水北调西线工程为案例,分析生态补偿机制中各经济因素对双方决策的影响,并提出相关可行性建议,讨论是否有途径能让生态补偿体系更加完善,以期为南水北调西线工程跨流域生态补偿机制的建设以及调水工程的可持续发展提供参考建议。

2. 研究区概况

南水北调西线工程主要涉及雅砻江、大渡河和金沙江等河流水系。雅砻江发源于青海省，于四川省攀枝花市注入金沙江，流域面积 13.6 万 km²，91%属于四川省，多年平均径流量 586 亿 m³；大渡河流域是岷江最大支流，流域面积 7.77 万 km²，多年平均径流量 468 亿 m³；金沙江发源地位于青海省，流域面积 47.32 万 km²，多年平均径流量 423 亿 m³。根据相关规划方案，西线调水总规模为 170 亿 m³，规划将长江流域上游的水调入黄河上游。

本文选定南水北调西线工程所在位置为研究区域，该工程从长江上游的雅砻江、大渡河和金沙江调水进入黄河流域中上游地区，涉及四川、青海与甘肃省三省。将工程涉及流域进行行政区划，其包括青海省黄南藏族自治州、称多县、久治县、玛曲县，四川省甘孜藏族自治州、凉山彝族自治州、阿坝藏族羌族自治州，甘肃省甘南藏族自治州、临夏回族自治州。

将西线工程涉及到的流域，即长江上游流域划分为调水区，黄河中上游流域划分为受水区，如图 1 所示。



底图审图号 GS(2016)2923 号。

图 1. 研究区示意图

3. 两方演化博弈模型构建

3.1. 利益相关者识别

识别利益相关者是构建演化博弈模型的前提[14]。跨流域调水工程涉及到调水区与受水区，其中调水区为调水输出口。为保证工程调水的水量与水质，调水区地方政府可能会考虑优先保护调水流域的生态环境，但

这会限制当地相关企业的发展；受调水区地方政府的政策影响，受水区经济发展及生态质量会发生相应的变化。由于调水工程的政策性加持，受水区需要考虑是否对调水区的经济损失进行生态补偿。两方受益关系的不均衡，导致了调水区与受水区的自发博弈。按地理区位将长江流域涉及地级行政区的地方政府作为流域上游地方政府，包括青海省称多县、久治县、四川省甘孜藏族自治州、凉山彝族自治州、阿坝藏族羌族自治州；把黄河流域涉及区县州的地方政府作为流域下游地方政府，包括青海省黄南藏族自治州、玛曲县，甘肃省甘南藏族自治州、临夏回族自治州。因此，本文的利益相关者为调水区地方政府与受水区地方政府(以下简称为调水方、受水方)。

3.2. 模型假设

西线工程中的博弈方为调水方和受水方。假设博弈双方是有限理性的，各博弈主体会根据国家法律的具体内容做出自身利益最大化的决策，为了分析各方策略和均衡点的稳定性，找出演化稳定策略，做出如下假设：

假设 1：调水方和受水方两个博弈主体具有有限理性且信息不完全对等，无法在博弈过程中找到最优策略，但是在学习过程中不断演化成长，最后达到稳定的状态。

假设 2：调水方的策略合集为“首要考虑保护流域生态”和“次要考虑保护流域生态”，其策略选择的概率分别为 x 与 $1-x$ ， $x \in [0,1]$ ；受水方的策略合集为“进行生态补偿”与“不进行生态补偿”，其策略选择的概率分别为 y 与 $1-y$ ， $y \in [0,1]$ 。

假设 3：调水方选择首要保护策略，使得下游流域生态环境得到提升时，必定会损失一定的发展机会成本，且生态保护措施需要付出一定成本，这两部分相加即为保护流域生态付出的生态成本 A_1 ，此时调水方获得的生态收益为 B_1 ，同时发电收益为 C_1 ；调水方选择次要保护策略时，无需付出生态成本，此时调水方获得的生态收益设为 0，发电收益不变，仍为 C_1 。

假设 4：当受水方选择生态补偿策略时，若调水方选择首要保护策略，则受水方向调水方支付生态补偿金 D_1 ，此时受水方获得的生态收益为 E_1 ，发电效益为 F_1 ；当受水方选择生态补偿策略时，若调水方选择次要保护策略，则受水方无成本支出。由于调水方并未进行流域生态保护，故设受水方无法获得生态收益。

假设 5：引入激励惩罚约束机制。调水方选择次要保护策略，受水方选择生态补偿策略时，调水方需要向受水方支付赔偿金 T_1 ；若与此相反，则受水方需要向调水方支付赔偿金 T_2 。同时，当双方都选择积极策略时，会获得一个额外生态收益 S ，此时按比例分配，对于调水方的分配系数为 i ($0 \leq i \leq 1$)，即调水方获得的额外生态收益为 iS ；则受水方所获得的额外生态收益为 $(1-i)S$ 。

基于上述假设的模型参数，确定其收益矩阵如表 1 所示。

表 1. 调水方与受水方博弈双方收益矩阵

	受水方(补偿) Y	受水方(不补偿) $1-Y$
调水方(首要保护) X	$B_1 + C_1 - A_1 + D_1 + iS,$ $E_1 + F_1 - D_1 + (1-i)S$	$B_1 + C_1 - A_1 + T_2,$ $E_1 + F_1 - T_2$
调水方(次要保护) $1-X$	$C_1 - T_1,$ $T_1 + F_1$	$C_1,$ F_1

3.3. 两方复制动态方程

调水方和受水方两方博弈主体之间相互影响、相互制约，为了获得最大期望收益不断调整策略，通过建立两方演化博弈复制动态方程，能够分析调水方和受水方两方稳定策略的形成过程，同时使用微分方程稳定性理

论, 可对调水方和受水方的策略进行稳定性分析。

调水方选择首要考虑保护流域生态的期望收益 U_{11} 为

$$U_{11} = B_1 + C_1 - A_1 + T_2 + yD_1 - yT_2 + yiS \quad (1)$$

调水方选择次要考虑保护流域生态的期望收益 U_{12} 为

$$U_{12} = C_1 - yT_1 \quad (2)$$

其平均收益 U_1 为

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

可得调水方策略选择的复制动态方程为:

$$F(x) = x(1-x)[B_1 - A_1 + T_2 + y(D_1 + T_1 - T_2 + iS)] \quad (4)$$

受水方选择进行生态补偿的期望收益 U_{21} 为

$$U_{21} = x(E_1 - T_1 - D_1) + T_1 + F_1 + (1-i)xS \quad (5)$$

受水方选择不进行生态补偿的期望收益 U_{22} 为

$$U_{22} = F_1 + x(E_1 - T_2) \quad (6)$$

其平均收益 U_2 为

$$U_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22} \quad (7)$$

可得受水方策略选择的复制动态方程为:

$$F(y) = y(1-y)[x(T_2 - T_1 - D_1) + T_1 + (1-i)xS] \quad (8)$$

调水方和受水方博弈主体之间相互影响、相互制约, 为了获得最大期望收益不断调整策略, 通过建立两方演化博弈复制动态方程, 能够分析两方博弈稳定策略。

3.4. 均衡点分析

均衡点分析旨在确定博弈系统的稳定策略, 即双方策略选择的长期收敛状态。通过计算雅可比矩阵的特征值, 可判断均衡点的稳定性。

本文中调水方和受水方演化博弈系统的雅可比矩阵是指, 由两方复制动态方程的一阶偏导数构成的, 可以反映策略调整速率对系统状态敏感性的判断矩阵 J 。其具体公式如下:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$F(x)$ 与 $F(y)$ 分别是 3.2 节中计算得到的复制动态方程。

由公式(9)计算得到调水方和受水方演化博弈系统的雅可比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)[B_1 - A_1 + T_2 + y(D_1 + T_1 - T_2 + iS)] & x(1-x)(iS + D_1 + T_1 - T_2) \\ y(1-y)[(1-i)S - D_1 + T_1 - T_2] & (1-2y)[T_1 + x(T_2 - T_1 - D_1) + (1-i)xS] \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于雅可比矩阵中存在 x, y 变量, 无法直接分析本次演化博弈系统稳定性。为此, 需要系统均衡点进行分

析，并将其代入雅可比矩阵中，才能计算得到雅可比矩阵的特征值，最后根据李雅普诺夫系统稳定性理论判断本次演化博弈系统的稳定性。

李雅普诺夫系统稳定性理论指出，雅可比矩阵特征值的正负可以判断系统的稳定性。定理表明，当雅可比矩阵中的所有特征值都具有负实部时，此均衡点所在系统处于渐进稳定状态；当雅可比矩阵中的所有特征值都小于等于 0 时，则此均衡点所在系统处于临界稳定状态；当雅可比矩阵中的任意一个具有正实部或等于 0 的特征值具有多重根时，则此均衡点所在系统处于不稳定状态[15]。

令动态复制方程为 0，即 $F(x)=0$ ， $F(y)=0$ ，我们可以得到 5 个系统均衡点，而由于雅可比矩阵的性质[16]，第五个均衡点 E 判断其处于非渐进稳定状态，故不展开讨论。求得其余均衡点对应特征值，如表 2 所示：

表 2. 均衡点及雅可比矩阵特征值

均衡点	λ_1	λ_2
$A(0,0)$	T_1	$B_1 - A_1 + T_2$
$B(0,1)$	$-T_1$	$B_1 - A_1 + D_1 + T_1 + iS$
$C(1,0)$	$T_2 - D_1 + (1-i)S$	$A_1 - B_1 - T_2$
$D(1,1)$	$D_1 - T_2 - (1-i)S$	$A_1 - B_1 - D_1 - T_1 - iS$

通过李雅普诺夫系统稳定性理论和假设条件我们发现，对几个系统均衡点进行分析时，需通过添加其它约束条件来判断。本文构建该模型旨在讨论分析在何种条件下，能够使南水北调西线工程中的博弈主体更大可能的做出合作保护流域生态策略的选择，以达到生态效益与经济效益、社会效益相统一的目的，并满足社会期望。因此选择均衡点 $D(1,1)$ 为目标策略，其代表调水方和受水方最大程度持有积极态度以做出决策。若要使演化博弈的两方主体策略稳定在 $D(1,1)$ 均衡点，根据李雅普诺夫系统稳定性理论，就要使其所有的特征值都小于零，其方程组如下：

$$\begin{cases} D_1 - T_2 - (1-i)S < 0 \\ A_1 - B_1 - D_1 - T_1 - iS < 0 \end{cases} \quad (11)$$

在此条件下， $B(0,1)$ ， $C(1,0)$ 处于不稳定状态， $A(0,0)$ 可能处于稳定状态。由此可知，即使在提前设定了假设条件的情况下，再添加约束条件也不能使稳定点存在唯一性，即此次博弈中存在混合策略点。

4. 两方演化博弈仿真分析

4.1. 额外生态收益的动态影响分析

为分析额外生态收益对两方均衡策略的影响，本节通过模拟流域上下游在不同情况下的决策过程，选取博弈双方中的额外生态收益 S 作为变量，同时根据 2022 年四川、青海、甘肃三省的统计年鉴、长江与黄河流域的《生态环境保护规划》及文献分析，设定演化过程的初始值 $(x,y)=(0.5,0.5)$ ，其余数值如表 3 所示。其中 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 F_1 、 T_1 、 T_2 单位为亿元； i 为分配系数，无单位。

表 3. 以额外生态收益 S 为研究对象的参数数值

参数集								
A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	F_1	i	T_1	T_2
14	9	11	12	8	7	0.4	10	10

为了研究额外生态收益 S 的大小对系统有何影响,令 S 取值为 4、12、25,对模型进行模拟仿真,模型通过离散时间迭代模拟策略演化过程,每次迭代代表一轮策略调整,得到动态演化过程如图 2 所示。图中 x 轴表示系统演化迭代的次数, y 轴表示博弈主体选择其对应积极策略的概率,例如调水方选择“首要保护”策略的概率 x ,受水方选择“补偿”策略的概率 y ,下同。

由图可知,这三组数据的整个演化过程都趋向于“1”,即当双方都能获得较多的额外生态收益时,双方都会选择积极策略。随着 S 的增大,演化过程趋向于“1”的速度越来越快,额外生态收益 S 对双方的动态演化起到了正相关的作用。也就是说,在现实中,这部分利益越大,双方选择积极策略的意愿越强,演化博弈就会更快的趋向于双方选择合作保护流域生态的稳定策略。

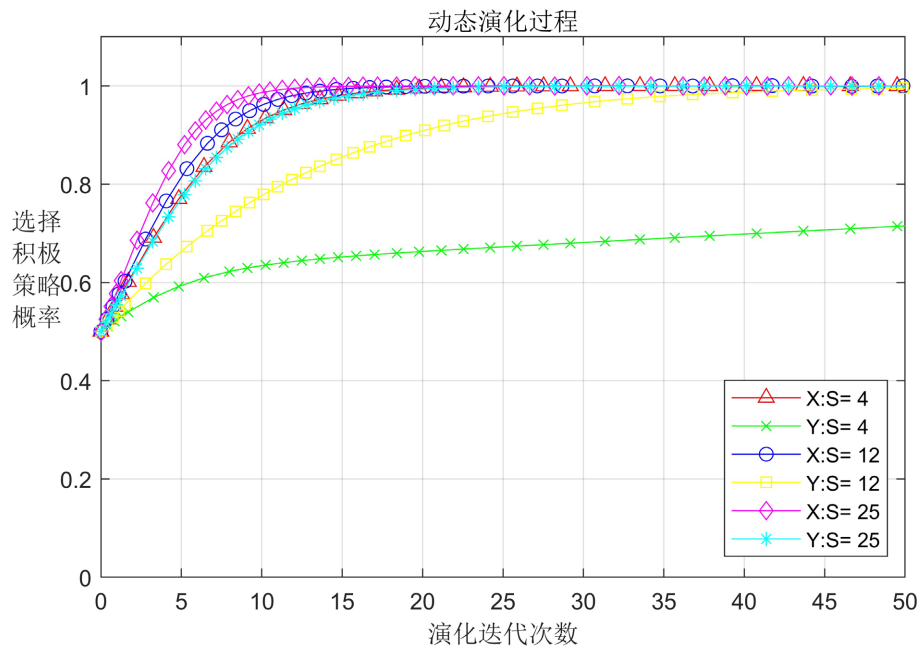


图 2. 不同额外生态收益 S 的仿真图

4.2. 付出成本的动态影响分析

为分析付出成本对两方均衡策略的影响,选取博弈双方各自选择积极策略时付出的成本(A_1, D_1)作为变量,其具体赋值如表 4 所示。其中 B_1 、 C_1 、 E_1 、 F_1 、 S 、 T_1 、 T_2 单位为亿元; i 为分配系数,无单位。

表 4. 以付出成本(A_1, D_1)为研究对象的参数数值

参数集							
B_1	C_1	E_1	F_1	S	i	T_1	T_2
9	11	8	7	6	0.5	10	10

为了研究付出成本的大小对系统有何影响,设定(A_1, D_1)为三组大小不同的取值,分别为(6, 4)、(12, 9)、(19, 15),进行模拟仿真后,得到动态演化过程如图 3 所示。

由图可知,仅仅在(A_1, D_1)分别取值(6, 4)、(12, 9)这两组数据的时候,整个演化过程都趋向于“1”,而(A_1, D_1)取值(19, 15)时, Y 所代表的博弈主体演化过程趋向于“0”。即当决策方认为付出的成本过高,自身能获得的利益被该成本埋没时,其选择积极策略的意愿会变弱。现实中,也许考虑到利益过小,博弈主体可能在演化博

弈中的策略选择会有所犹豫,但最终还是会选择消极的策略。当选择积极策略所需要付出的成本变大以后,会使得双方选择积极策略的用时增加,延缓了动态演化逐步达到稳定的过程。也就是说,在总体可获得收益不变的情况下,成本越小,双方都选择保护的意愿越强,这与实际情况相符。

在激励惩罚约束机制下,合理的激励手段可以增强博弈主体选择积极策略的意愿。同时也说明此机制在此情景下的演化博弈中能够影响博弈主体做出的策略选择。

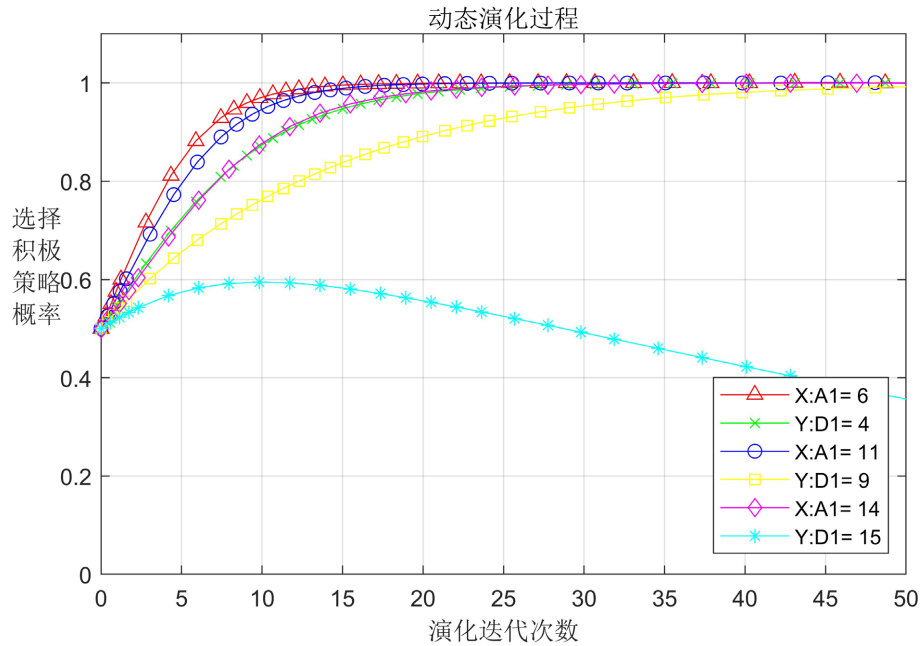


图 3. 不同付出成本(A_1, D_1)的仿真图

4.3. 额外生态收益分配比例的动态影响分析

为分析额外生态受益分配比例对两方均衡策略的影响,选取额外生态收益中分配比例 i 作为变量,其具体赋值如表 5 所示。其中 $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, S, T_1, T_2$ 的单位为亿元; i 为分配系数,无单位。

表 5. 以额外生态收益分配比例 i 为研究对象的参数数值

参数集								
A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	F_1	S	T_1	T_2
14	9	11	12	8	7	6	10	10

设定 i 取值为 0.1、0.5、0.9,进行模拟仿真后,得到动态演化过程如图 4 所示。

由图可知,仅仅在 $i=0.1$ 与 $i=0.5$ 这两组数据时,整个演化过程都趋向于“1”,而 $i=0.9$ 时,其代表的博弈主体演化过程趋向于“0”。观察发现本次动态演化中存在两种不公平的分配方式,分别为 $i=0.1$ 和 $i=0.9$,分析可得,无论是否公平分配,对于调水方是否选择积极策略的影响不大,说明此种情况下,调水方经过博弈后认为利益足够,其选择积极策略的意愿十分高;反观受水方,是否公平分配对其影响巨大,甚至出现了演化过程趋向于“0”的情况,这说明受水方策略的选择对分配系数的大小十分敏感。同时,分配利益越多,对应主体选择积极策略的演化过程越快。由此可见,取得利益较大的一方往往会快速地选择积极的策略。在现实情况中,也应当注意利益的分配情况。

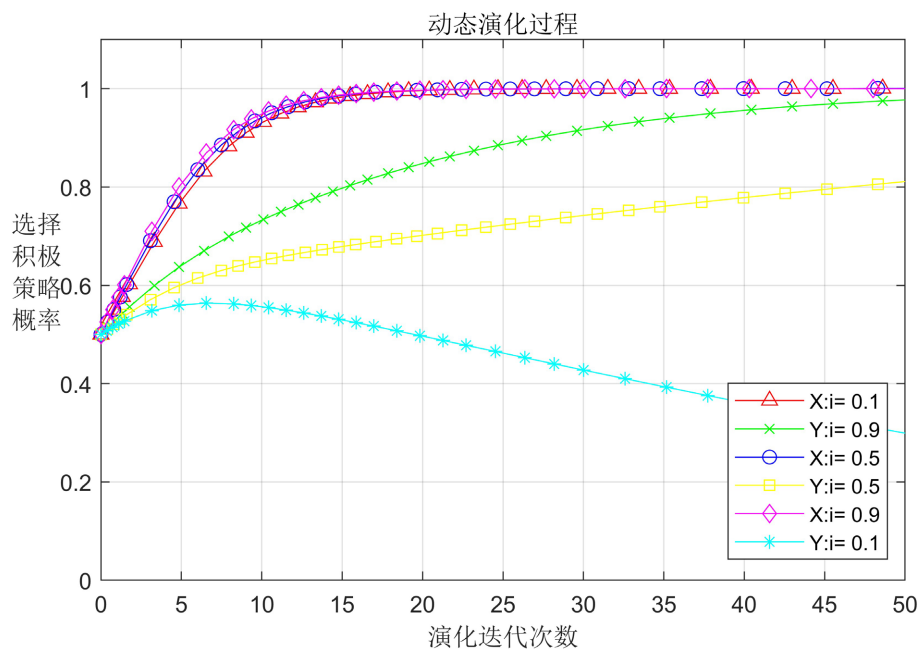


图 4. 不同额外生态收益分配比例 i 的仿真图

4.4. 赔偿金的动态影响分析

为分析赔偿金对两方均衡策略的影响,选取博弈双方需要支出的赔偿金作为变量,其具体赋值如表 6 所示。其中 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 F_1 、 S 的单位为亿元; i 为分配系数,无单位。

表 6. 以赔偿金(T_1 , T_2)为研究对象的参数数值

参数集							
A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	F_1	S	i
14	9	11	12	8	7	6	0.4

为了研究惩罚金额的大小对系统有何影响,设定(T_1 , T_2)为三组大小不同的取值,分别为(3, 5)、(11, 9)、(14, 16),进行模拟仿真后,得到动态演化过程如图 5 所示。

由图可知,当赔偿金高于一定金额时,双方都会避免赔偿而去选择积极策略,且赔偿金额越高,趋向于“1”的速度越快。而当(T_1 , T_2)为(3, 5)时,可以发现受水方趋向于选择消极策略,这说明在赔偿金金额较小的情况下,受水方宁愿赔偿给调水方也不愿意进行生态补偿。由此可见,在激励惩罚约束机制下,过少的赔偿金额会使得博弈主体出现选择消极策略的情况。同时也说明合理的惩罚手段能够影响博弈主体策略的选择。

5. 讨论分析

根据南水北调西线工程涉及流域的各省市统计年鉴以及水资源公报等资料的统计,以调水区相关流域面积占比最大的四川省为例,2020 年四川省范围内调水区地区生产总值总和为 2555 亿元,而环境污染治理投资占 GDP 比重的 1.6%。由此可见,调水区政府对于流域生态环境的治理十分重视。在实际情况中,受水区政府对于水质水量的要求会导致调水区政府水环境治理成本提高,经济发展受阻。由图 3 可知,当博弈双方付出成本增大到一定程度时,会导致其选择积极策略的概率趋近于 0。因此,需要完善生态补偿机制,使用受水区的经济补偿以此来减少调水区政府的付出成本,这样一来,调水区政府愿意选择积极策略为受水区提供优质的水

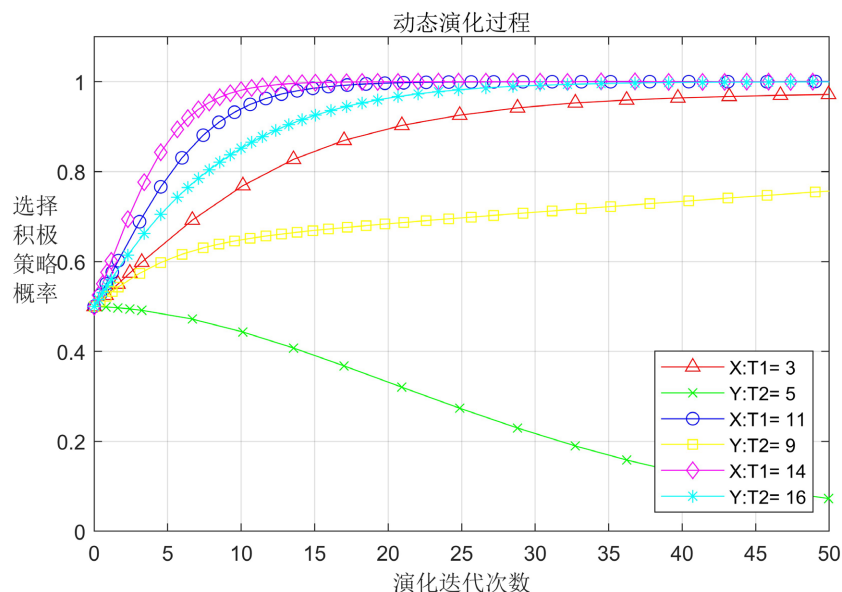


图 5. 不同赔偿金(T_1 , T_2)的仿真图

源, 并带来生态收益, 因此受水区也会愿意选择积极策略, 双方同时得到额外的生态收益; 图 2 表明了额外生态收益越大, 双方选择积极策略的意愿越强。在此情况下, 调水区、受水区双方选择积极策略会得到正向反馈, 实现生态效益与经济效益、社会效益的统一。

另外, 由于农业与工业耗水量大的特点, 可以认为第一产业与第二产业的地区生产总值代表了该地区使用水资源可获取的经济收入[17]。2020 年, 阿坝州、甘孜州、凉山州第一产业与第二产业的地区生产总值占总 GDP 的 43.3%、45.3%和 55.8%, 工农业用水量分别占总用水的 55.2%、72.5%和 84.6%, 说明调水区内地以水资源作为当地经济发展的核心要素之一。而调水区内地阿坝州、甘孜州、凉山州 2020 年耗水产业人均地区生产总值分别为 4.97 万元、3.58 万元和 3.04 万元, 仅为全国平均水平的 61.4%、44.2%和 37.6%, 总体水平较低, 其说明了南水北调西线工程未来的开展, 势必会影响调水区当地人民的经济社会发展, 需要政府来推动并监察生态补偿机制的实行效果及力度, 形成调水区与受水区利益双赢的局面。本文中激励约束机制的因素为额外生态受益分配比例以及赔偿金额大小的制定。由图 4、图 5 可知, 不公平的分配方案会导致博弈双方无法同时选择积极策略; 过小的惩罚金额又无法约束博弈双方选择积极策略。因此, 政府需要在此情景下制定公平的额外生态受益分配方案以及合理的惩罚手段, 这是保证南水北调西线工程生态效益与经济效益、社会效益相统一的重要手段。

6. 结论与建议

6.1. 结论

本文以南水北调西线工程为背景, 以调水方和受水方为博弈主体, 引入生态补偿和激励惩罚约束机制, 运用演化博弈模型分析调水方与受水方选择策略的动态演化过程及仿真结果, 得到结论如下:

1) 各主体的策略选择结果与额外生态收益、付出成本等因素具有较强的相关性。跨流域调水生态补偿过程中, 上下游政府策略的选择会相互影响, 且演化博弈策略的稳定性受额外生态收益、付出成本、额外生态收益的分配比例以及赔偿金等因素的共同影响。而各主体的策略选择结果与发电收益及生态收益的相关性较小, 原因可能是该系统未考虑调水量以及调水量的变化对发电收益的影响, 同时发电收益也不会随着主体决策的改变而改变。

2) 政府的引入对博弈双方的策略选择结果影响较大。在本文的博弈中, 引入了激励惩罚约束机制, 结果显示, 无论是激励手段还是惩罚手段, 都会对演化博弈系统的稳定性产生影响。

6.2. 建议

基于以上结论,对南水北调西线工程生态补偿机制的相关建议如下:

1) 减少各博弈主体的成本。可通过提高公众环保意识、提高流域相关企业对生态补偿机制的认可程度以及加大奖惩力度等方式,以减少博弈主体选择“首要考虑保护流域生态”以及“进行生态补偿”策略所需要付出的成本。

2) 强化政府相关职能。激励惩罚约束机制可以改善流域生态保护中调水方和受水方的“囚徒困境”,干预双方决策向着社会所期待的方向进行演变,能够保证南水北调西线工程生态效益与经济效益、社会效益相统一。

3) 推进多元化生态补偿机制。政府需要推动《生态保护补偿条例》中所提到的生态补偿方式如财政纵向补偿等,加强和规范生态保护补偿推行,调动参与生态保护个体的积极性,推动生态文明建设,同时推进生态补偿可持续发展。

基金项目

国家重点研发计划:变化环境下水源区水资源禀赋与可调水量研究 2022YFC3202403。

参考文献

- [1] 王玉莲, 杨泽凡, 闫龙, 等. 基于多方法综合比较的南水北调西线工程水源区生态需水研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 137-147.
- [2] 于洪贤, 柴青宇, 李晓钰, 等. 基于生态补偿的穆棱河流域生态文明建设[J]. 水资源研究, 2018, 7(6): 623-629.
- [3] 董翌, 刘志, 黄嘉伟. 跨省流域横向生态补偿法律机制的问题与思考[J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版), 2024, 40(5): 63-74.
- [4] 马毅军, 李珂. 流域生态补偿研究综述[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(8): 108-111.
- [5] 孙玉环, 张冬雪, 丁娇, 等. 跨流域调水核心水源地生态补偿标准研究——以丹江口库区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(6): 1262-1271.
- [6] 李继清, 薛智明, 谢开杰. 跨流域调水工程受水区生态补偿标准研究[J]. 水力发电, 2021, 47(1): 1-6+33.
- [7] PENG, Z. Y., PU, H. R., HUANG, X., et al. Study on public willingness and incentive mechanism of ecological compensation for inter-basin water transfer in China in the carbon neutral perspective. Ecological Indicators, 2022, 143: 109397. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109397>
- [8] 骆进仁, 韩前菊. 欠发达地区间跨流域调水工程生态补偿中区域博弈关系研究[J]. 兰州交通大学学报, 2022, 41(2): 143-148.
- [9] 周申蓓, 李嘉欣, 张子霞. 跨流域调水三方合作博弈生态补偿研究——以南水北调中线工程为例[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(11): 2371-2382.
- [10] LU, Y. L., FAN, L. F. and ZHAI, L. Y. Evolutionary game analysis of inter-provincial diversified ecological compensation collaborative governance. Water Resources Management, 2022, 37(1): 341-357. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03375-y>
- [11] 康艳青, 毛柯予, 朱永明. 成本分担下黄河流域跨省生态补偿利益均衡分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(3): 79-84.
- [12] 席猛, 张馨心, 安瑾诺, 等. 基于三方演化博弈的黄河流域生态补偿合作治理研究[J]. 中国高新科技, 2023(20): 83-6.
- [13] 刘林玲, 刘红琴, 谭丽峰. 基于多利益主体的调水工程生态补偿演化博弈分析[J]. 资源与产业, 2024, 26(1): 154-61.
- [14] 卢泉, 刘雪雪, 刘亮, 等. 基于演化博弈的新疆博斯腾湖流域生态补偿机制研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(3): 75-79.
- [15] 胡玉文, 徐久成, 张倩倩. 决策演化集的李雅普诺夫稳定性[J]. 山东大学学报(理学版), 2023, 58(7): 52-59.
- [16] 刘宜, 苏夏. 环境保护型政府性基金虚报冒领行为演化博弈分析——以废弃电器电子产品处理基金为例[J]. 四川环境, 2020, 39(1): 129-37.
- [17] 袁宝招, 陆桂华, 李原园, 等. 水资源需求驱动因素分析[J]. 水科学进展, 2007(3): 404-409.