

博弈视角下跨界河流水资源保护协作机制 ——以太湖流域太浦河为例

杨梦杰^{1,2}, 杨凯^{1,2}, 李根^{1,2}, 牛小丹^{1,2}

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海城市化生态过程和生态恢复重点实验室, 上海 200241;

2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 跨界河流水资源保护利益协调问题是流域水资源管理的难点。以太湖流域典型跨界河流太浦河为例, 对比分析上下游水资源保护利益诉求, 基于博弈理论, 引入外部驱动(流域机构介入、激励约束政策)与内部均衡(生态补偿、断面水质考核)四种协调手段, 探讨均衡太浦河上下游利益矛盾、激励上下游实现合作保护的协作机制。结果表明: (1) 在引入协调手段的博弈模型中, 实现了博弈系统向协作策略(达标, 补偿)演化。(2) 基于博弈分析结果, 协作策略(达标, 补偿)的实现与激励约束力度、补偿金额、水权、上游保护成本与效益等因素密切相关。(3) 外部驱动机制有利于协调上下游河流功能定位需求差异, 并调动上下游加强协作保护的积极性与主动性; 内部均衡机制有利于弥补上游水权、产业发展等利益损失, 并倒逼太浦河水质达标、保障下游取水安全。(4) 构建的太浦河水资源保护协作机制, 可为加快推进长三角一体化协同发展, 建设流域“清水走廊”提供理论与决策支持参考。

关键词: 水资源保护; 协作机制; 博弈分析; 跨界河流; 太浦河

流域是具有整体性、区域性与关联性的复合系统, 流域内的各自然要素相互关联, 地区间密不可分且相互影响^[1-3]。然而, 不同行政区域容易因为追求地方利益最大化而引发利益矛盾与冲突, 是流域水资源管理长期存在的难点问题^[4-5]。解决上下游之间的利益诉求, 协调流域上下游协同发展, 是当前流域水资源管理中亟待解决的现实问题^[6]。

博弈理论作为研究决策主体行为以及决策均衡问题的模型方法, 能较好地模拟不同方面的利益冲突, 结合冲突特征, 从而获得可行的冲突解决方案^[7-8]。近些年来, 国内外众多学者利用博弈理论针对流域跨界水资源管理与保护进行了较为深入的研究^[9-11]。在流域水资源分配方面, Ansink等^[12]利用博弈论模型对水资源分配协议的稳定性进行了评估, 并考虑了气候变化及不同合作条件对稳定性的影响; Wang等^[13]基于合作博弈理论方法研究了如何公平地分配流域水资源, 以实现水资源的最优配置。在治理成本分摊方面, Shi等^[14]提出了一种流域跨界污染物减排成本模型, 并对四种成本分摊机制的公平性及稳定性进行了讨论; 赖苹等^[15]利用合作博弈理论, 针对流域水污染治理的成本分摊问题构造成本分摊博弈, 并结合实例证明了该方法的有效性。在生态补偿机制探讨方面, 曹洪华等^[16]通过建立非对称演化博弈模型, 分析生态补偿过程动态演化机制及其稳定策略; 胡振华等^[17]基于演化博弈的视角探究了漓江流域上下游政府之间的利益均衡及生态

收稿日期: 2018-09-01; 修订日期: 2019-03-01

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207003-01)

作者简介: 杨梦杰(1995-), 男, 安徽阜阳人, 硕士, 主要从事流域水资源管理研究。E-mail: ymj0717@163.com

通讯作者: 杨凯(1964-), 男, 安徽淮南人, 教授, 主要从事环境评价与规划方面的教学与科研工作。

E-mail: kyang@re.ecnu.edu.cn

补偿机制。也有研究表明,在缺乏激励机制时的流域地方政府博弈,由于利益分配问题而难以达成合作治理,但引入相应的激励约束条件则有助于引导地方政府执行合作治理决策,从而实现环境质量的改善^[18-19]。

综合已有研究成果来看,目前博弈理论在跨界流域水资源管理中的研究多侧重于水资源分配、治理成本及生态补偿等微观层面,而宏观层面的合作保护激励机制较多的是建立抽象的博弈模型,指出引入外界激励约束条件的必要性,但对如何调动地方政府间实现合作保护的协作机制方面缺乏深入的研究^[20-22]。在已有研究的基础上,本文以长三角地区典型跨界河流太浦河为例,在对比分析太浦河上下游地区的水资源保护利益诉求的基础上,基于博弈理论模型,引入四种协调手段,探索激励太浦河上下游地区实现合作保护的协作机制,同时旨在为实现长三角区域跨界河流水资源协同保护提供理论与决策支持参考。

1 研究区概况

太浦河是长三角地区涉及上海、江苏及浙江两省一市的典型跨界河流,长约57 km。太浦河自开通以来,主要承担着泄洪、航运及供水的功能,并承载着江苏吴江、浙江嘉善及上海青浦的部分经济社会发展。当前太浦河沿线下游浙江省、上海市内均分布有饮用水取水口,其中上海市青浦区水源地金泽水库于2016年底启用,为上海市约670万居民供水。根据国务院批复的《太湖流域水功能区划(2010-2030年)》(国函〔2010〕39号),已将太浦河整体划分为苏浙沪调水保护区,水质保护目标为II~III类;国务院批复的《太湖流域综合规划(2012-2030年)》(国函〔2013〕39号)也明确将太浦河作为流域安全行洪“高速通道”和水资源配置的“清水走廊”,确保下游供水安全。但由于太浦河上游吴江地区与下游嘉善、青浦地区因区域内产业发展现状、太浦河功能定位等差异,使得上下游之间因太浦河水资源保护与利用存在着亟需解决的利益矛盾与诉求,其中区域内典型特征如图1所示。

1.1 上游地区水资源保护利益诉求分析

太浦河上游吴江地区区域经济发展、人口密集、工业企业众多,太浦河主要为其提供着泄洪、航运的功能。一方面,吴江地区的社会经济发展现状带来了多种因素影响太浦河干流水质,对下游水源地取水安全造成了显著的影响。水质影响因素主要包括(1)工业企业:吴江区是中国重要的纺织行业集聚地,区域内纺织印染企业多达上百家;(2)航运:航运业繁忙,运输货物含化学品、砂石等,并存在油类污染及船舶侧翻的风险;(3)岸线利用:两岸分布有水泥厂、油罐仓储及船舶加油站等;(4)支流汇水:以京杭大运河为主的支流汇入水质较差;(5)农业面源:污染控制难度大等方面。此外,近年来太浦河发生过数次镉污染风险事件^[23],主要是由于区域内有众多纺织、印染企业,其排放的工业污水中镉浓度含量较高,当区域内出现暴雨时,周边河网水位快速上涨,通过支流最终汇入太浦河,造成太浦河干流镉浓度升高,从而直接威胁下游饮用水源地数百万居民取水安全^[24]。

由于下游嘉善、青浦地区饮用水源地的建设,对上游吴江地区的水环境保护提出了更高的要求,在确保下游供水充足的同时,要使得太浦河干流水质达到II~III类的目标,并消除流域镉污染风险。因此,上游吴江地区为改善太浦河水质,不得不加强开展区域

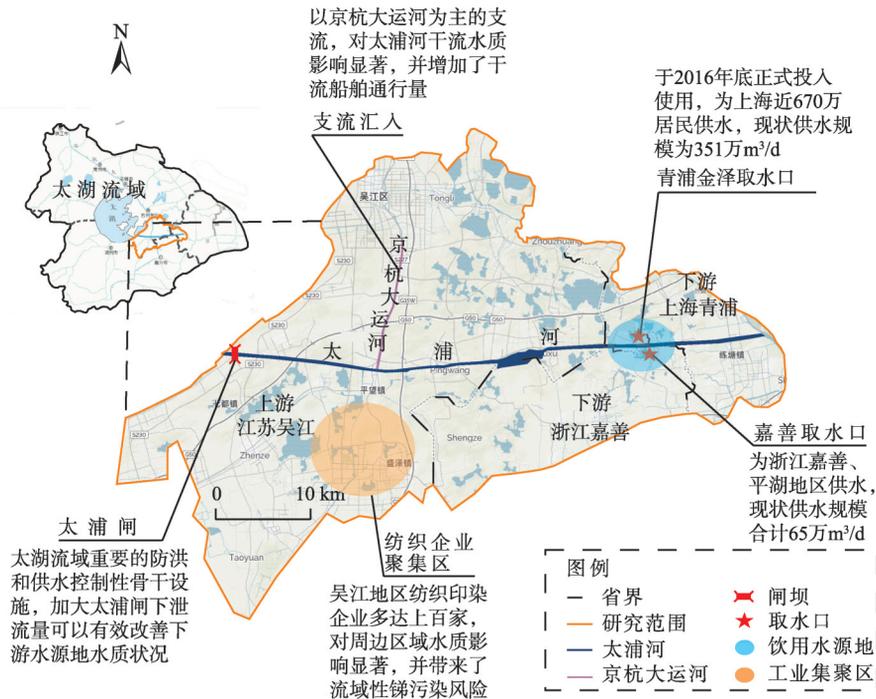


图1 太浦河上下游地区区位及区域典型特征

Fig. 1 The location of the Taipu River and typical regional characteristics of the upstream and downstream regions

内工业企业等重点源污染治理、农业面源污染防控，并加强航运监管及建立船舶污染防治应急体系等措施。在应对镉污染等流域突发风险事件时，也只有采取“一刀切”的办法来降低废水中镉含量，即停产、限产相关工业企业^[23]。此外，并通过调控太浦闸下泄流量，即调度太湖清水予以稀释，以改善太浦河干流水质状况及保障供水充足^[25]等。因此，吴江地区为应对水质、水量要求的提高，面临着纺织等产业发展受限，资金投入大及水权损失等问题，自身经济社会发展利益受到影响，因此上游吴江地区期望本身的生产发展机会、水权及保护成本等利益应得到保障。

1.2 下游地区水资源保护利益诉求分析

由于下游青浦、嘉善地区饮用水水源地的建设与使用，使得下游对太浦河功能定位的需求向水资源配置的“清水走廊”偏移，太浦河下游越来越大的取水规模对上游来水的水量与水质提出了更高的要求。下游地区期望上游地区能够加大防控措施来确保太浦河水质达到II-III类的保护目标，消除流域镉污染风险，并加大太浦闸下泄流量，以确保水质达标及水量充沛。但针对上游吴江地区因保护而经济社会发展利益受损的问题，可能由于相关激励机制的缺失，使得下游青浦、嘉善地区对上游吴江地区水资源保护成本的承担，即实施横向生态补偿的积极性与主动性不足。

总的来说，是由于下游青浦、嘉善地区饮用水水源地的建设对上游吴江地区提出了更高的水量和水质要求，而当前上游吴江地区的经济社会发展现状致使太浦河水环境保护难度大，经济利益受损，导致了太浦河上下游地区的利益冲突，进而引发了太浦河上下游地区不同的水资源保护利益诉求，如图2。当前太浦河上下游水资源保护利益矛盾阻碍了流域一体化发展进程。为建设流域重要的水资源配置“清水走廊”，协调太浦河上下

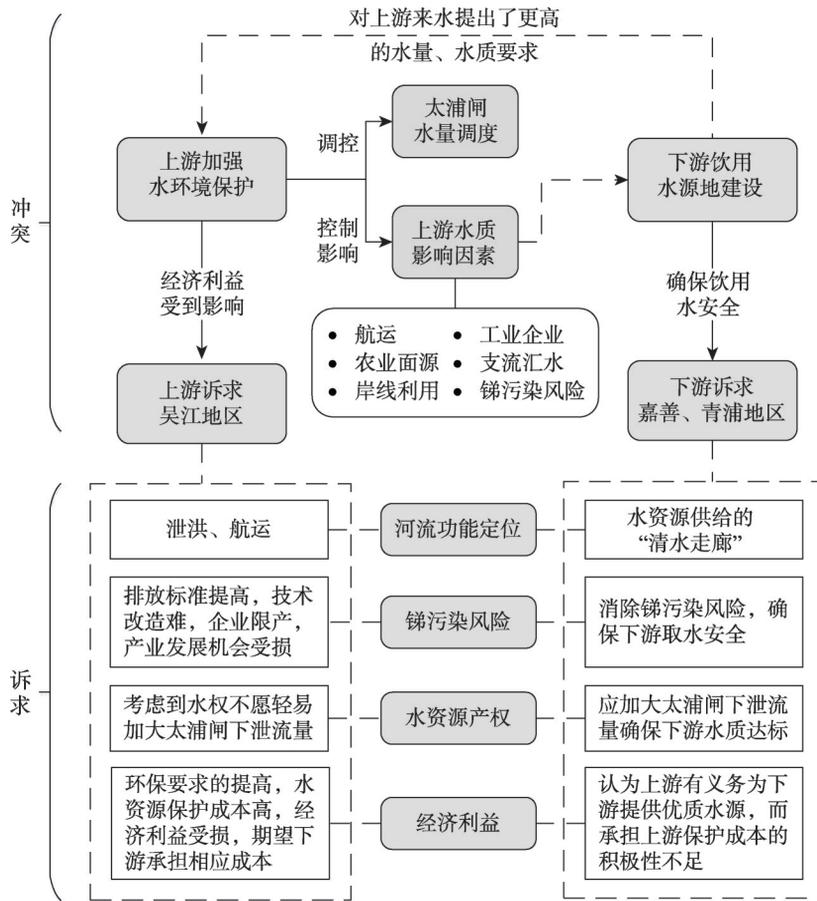


图2 太浦河上下游地区水资源保护利益冲突及诉求分析

Fig. 2 The conflicts and interests of stakeholders on water resources protection in the upstream and downstream regions of the Taipu River

游地区水资源保护利益矛盾也是当前长三角一体化发展的重要议题。

2 太浦河上下游地区水资源保护博弈分析

胡振华等^[17]、牛小丹等^[26]、李宁等^[27]研究分析指出,若要使得流域上下游地区通过博弈走向合作道路,仅仅依靠政府间的自主博弈是难以实现的,还需要外界条件的激励与引导。因此,本文为聚焦于流域跨界河流水资源协作保护机制的探讨,在已有研究的基础上,以太湖流域典型跨界河流太浦河为例,分析其上下游地区水资源保护利益诉求,尝试基于博弈理论模型,结合太浦河流域背景现状,引入外部驱动“流域机构介入”“激励约束政策”与内部均衡“生态补偿”以及“断面水质考核”等协调手段,对此博弈模型下的上下游地区博弈稳定策略进行分析,从而探讨协调上下游地区协作保护太浦河水资源的机制。

2.1 博弈模型情景假设

假设1:根据上文对太浦河上下游地区的利益诉求分析,考虑到浙江省和上海市的基本诉求相似,故设定博弈模型的主要参与者:太浦河上游地区为江苏省吴江地区,太

浦河下游地区为浙江省嘉善与上海市青浦地区（由于太浦河上下游利益主体众多，包括地方政府、企业、公众及社会团体等，统筹考虑太浦河上下游利益矛盾，以太浦河上、下游地区利益代指上、下游各利益主体整体利益），且上下游两方均为有限理性主体。

假设2：针对上游吴江地区，结合“断面水质考核”的引入，可以采取“达标”策略（即加强区域内企业排污，岸线利用等防治，并合理调控太浦闸调度，保障太浦河水水质达到II~III类）与“不达标”策略（即上游吴江地区针对太浦河水环境保护的力度不足，使得水质未达到II~III类的要求）。假设上游地区选择“达标”策略的概率为 x ($0 \leq x \leq 1$)，则选择“不达标”策略的概率为 $1-x$ 。

对于下游嘉善、青浦地区而言，基于“生态补偿”的引入，有“补偿”策略（即积极分担上游地区保护太浦河水资源的成本与发展利益损失）与“不补偿”策略（由于自身利益及积极性不足，不对上游地区水资源保护成本进行补偿）。假设下游地区选择“补偿”策略的概率为 y ($0 \leq y \leq 1$)，则选择“不补偿”策略的概率为 $1-y$ 。

假设3：基于流域管理机构的介入，针对性地提出相应的激励约束政策。即若太浦河上下游地区哪一方采取合作策略（即相应地“达标”与“补偿”），则流域管理机构（太湖流域管理局）对其进行奖励；而相反，若哪一方采取不合作的策略（即相应地“不达标”或“不补偿”）时，则流域管理机构（太湖流域管理局）对其进行惩罚。

结合太浦河上下游的背景现状情况，设定相关模型参数如表1所示。

因此，构建太浦河上下游地区针对水资源保护的博弈收益矩阵，如表2所示。

2.2 太浦河上下游地区博弈稳定策略分析

上游地区选择“达标”或“不达标”策略时的期望收益为 U_{A1} 或 U_{A2} ，整体的平均期

表1 博弈模型相关参数设定及含义

Table 1 The parameters and meanings of the game model

相关参数	含义
A_1	上游地区采取“达标”策略时使得水生态环境改善而带来的环境综合效益
A_2	上游地区采取“不达标”策略时的收益，作为上游初始收益
C	上游地区采取“达标”策略时直接投入的成本以及丧失的可发展机会成本
D	上游地区采取“达标”策略时，通过加大太浦闸下泄流量所损失的水权
B_1	上游地区采取“达标”策略时下游地区所得的环境综合效益，即因水质达标而得的效益
B_2	上游地区采取“不达标”策略时下游地区的收益，作为下游初始收益
P	下游地区给予上游地区的生态补偿量
E	上下游地区仅单方面采取合作策略（即“达标”或“补偿”）时，则流域机构对其的奖励
F	上下游地区仅单方面采取不合作策略（即“不达标”或“不补偿”）时，则流域机构对其的惩罚
G	上下游地区均采用不合作策略（即“不达标”和“不补偿”）时受到来自流域机构的惩罚；均采用合作措施（即“达标”和“补偿”策略）时受到来自流域机构的奖励

注：所有参数取值均大于0。

表2 太浦河水资源保护中上下游地区博弈收益矩阵

Table 2 The game matrix of water resources protection among the upstream and downstream regions in the Taipu River

上游地区	下游地区	
	补偿	不补偿
达标	$A_1 + A_2 - C + P - D + G, B_1 + B_2 - P + G$	$A_1 + A_2 - C - D + E, B_1 + B_2 - F$
不达标	$A_2 + P - F, B_2 - P + E$	$A_2 - G, B_2 - G$

望收益为 U_A , 则有:

$$U_{A1} = (A_1 + A_2 - C + P - D + G)y + (A_1 + A_2 - C - D + E)(1 - y) \quad (1)$$

$$U_{A2} = (A_2 + P - F)y + (A_2 - G)(1 - y) \quad (2)$$

$$U_A = xU_{A1} + (1 - x)U_{A2} \quad (3)$$

下游地区选择“补偿”和“不补偿”策略时的期望收益为 U_{B1} 或 U_{B2} , 整体的平均期望收益为 U_B , 则有:

$$U_{B1} = (B_1 + B_2 - P + G)x + (B_2 - P + E)(1 - x) \quad (4)$$

$$U_{B2} = (B_1 + B_2 - F)x + (B_2 - G)(1 - x) \quad (5)$$

$$U_B = yU_{B1} + (1 - y)U_{B2} \quad (6)$$

由式(1)~式(3)与式(4)~式(6)可以得出太浦河上游地区采取“达标”策略以及下游地区采取“补偿”策略的复制动态方程 $F(x)$ 和 $F(y)$ 分别为:

$$F(x) = dx/dt = x(U_{A1} - U_A) = x(1 - x)[(F - E)y + A_1 + E + G - C - D] \quad (7)$$

$$F(y) = dy/dt = y(U_{B1} - U_B) = y(1 - y)[(F - E)x + E + G - P] \quad (8)$$

(1) 太浦河上游地区稳定策略分析

根据式(7), 令 $F(x) = 0$, 可得复制动态方程的三个稳定状态点: $x^* = 0$ 、 $x^* = 1$ 以及 $y^* = (C + D - A_1 - E - G) / (F - E)$, 且 $0 \leq (C + D - A_1 - E - G) / (F - E) \leq 1$ 。

若 $y = y^* = (C + D - A_1 - E - G) / (F - E)$ 时, 则 $F(x)$ 等于 0, 此时对于上游地区来说, 所有的 x 均是稳定状态, 不符合所期盼的目标策略。

若 $y > y^* = (C + D - A_1 - E - G) / (F - E)$ 时, $x^* = 0$ 与 $x^* = 1$ 为两个稳定状态, 当 $F - E > 0$ 时, $F'(1) < 0$, $F'(0) > 0$, 此时 $x^* = 1$ 是演化稳定策略; 当 $F - E < 0$ 时, $F'(0) < 0$, $F'(1) > 0$, 此时 $x^* = 0$ 是演化稳定策略。因此, 当下游地区采取“补偿”策略的概率大于 $(C + D - A_1 - E - G) / (F - E)$ 时, 只有当 $F - E > 0$, 才会使得“达标”策略逐渐演化为上游地区的稳定策略。

若 $y < y^* = (C + D - A_1 - E - G) / (F - E)$ 时, $x^* = 0$ 与 $x^* = 1$ 为两个稳定状态, 当 $F - E > 0$ 时, $F'(0) < 0$, $F'(1) > 0$, 此时 $x^* = 0$ 是演化稳定策略; 当 $F - E < 0$ 时, $F'(1) < 0$, $F'(0) > 0$, 此时 $x^* = 1$ 是演化稳定策略。因此, 当下游地区采取“补偿”策略的概率小于 $(C + D - A_1 - E - G) / (F - E)$ 时, 只有满足 $F - E < 0$, 才会使得“达标”策略逐渐演化为上游地区的稳定策略。

(2) 太浦河下游地区稳定策略分析

同理, 根据式(8), 令 $F(y) = 0$, 可得复制动态方程的三个稳定状态点: $y^* = 0$ 、 $y^* = 1$ 以及 $x^* = (P - E - G) / (F - E)$ 。

若 $x = x^* = (P - E - G) / (F - E)$ 时, 则 $F(y)$ 等于 0, 此时对于下游地区来说, 所有的 y 均是稳定状态, 故不符合所期盼的合作策略。

若 $x > x^* = (P - E - G) / (F - E)$ 时, $y^* = 0$ 与 $y^* = 1$ 为两个稳定状态, 当 $F - E > 0$ 时, $F'(1) < 0$, $F'(0) > 0$, 此时 $x^* = 1$ 是演化稳定策略; 当 $F - E < 0$ 时, $F'(0) < 0$, $F'(1) > 0$, 此时 $x^* = 0$ 是演化稳定策略。因此, 当上游地区采取“达标”策略的概率大于 $(P - E - G) / (F - E)$ 时, 只有满足 $F - E > 0$, 才会使得“补偿”策略逐渐演化为下游地区的稳定策略。

若 $x < x^* = (P - E - G) / (F - E)$ 时, $y^* = 0$ 与 $y^* = 1$ 为两个稳定状态, 当 $F - E > 0$ 时,

$F'(0)<0, F'(1)>0$, 此时 $x^*=0$ 是演化稳定策略; 当 $F-E<0$ 时, $F'(1)<0, F'(0)>0$, 此时 $x^*=1$ 是演化稳定策略。因此, 当上游地区采取“达标”策略的概率小于 $(P-E-G)/(F-E)$ 时, 只有满足 $F-E<0$, 才会使得“补偿”策略逐渐演化为下游地区的稳定策略。

由上述分析可得该博弈模型共有 5 个局部均衡点 $O(0, 0)$ 、 $A(1, 0)$ 、 $B(1, 1)$ 、 $C(0, 1)$ 、 $D(x^*, y^*)$, 其中 $B(1, 1)$ 和 $O(0, 0)$ 是能够成为稳定策略的, 且 $B(1, 1)$ 为目标均衡点, 即实现上下游采取(达标, 补偿)的目标策略组合。

2.3 太浦河上下游地区博弈目标策略稳定性分析

为确定该模型下的太浦河上下游地区动态演化博弈仅稳定达到(达标, 补偿)策略组合的条件, 可以根据 Friedman 提出的雅克比矩阵局部稳定分析得出^[28]。该动态演化博弈的雅克比矩阵为:

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

$$= \begin{bmatrix} (1-2x)[(F-E)y + A_1 + E + G - C - D] & x(1-x)(F-E) \\ y(1-y)(F-E) & (1-2y)[(F-E)x + E + G - P] \end{bmatrix}$$

其中, 矩阵对应的行列式与迹分别为:

$$\begin{cases} \det . J = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \frac{\partial F(y)}{\partial y} - \frac{\partial F(x)}{\partial y} \frac{\partial F(y)}{\partial x} \\ \text{tr} . J = \frac{\partial F(x)}{\partial x} + \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{cases} \tag{10}$$

将各局部均衡点代入式 (10) 进行稳定性分析, 如表 3 所示。若博弈策略组合 (x, y) 是演化博弈稳定策略, 则有 $\det . J > 0$ 、 $\text{tr} . J < 0$ 。

表 3 动态演化博弈局部均衡点稳定性

Table 3 The stability of the partial equilibrium points of the dynamic evolution game theory

均衡点	det.J	tr.J
$O(0, 0)$	$(A_1+E+G-C-D)(E+G-P)$	$(A_1+E+G-C-D)+(E+G-P)$
$A(1, 0)$	$-(A_1+E+G-C-D)(F+G-P)$	$-(A_1+E+G-C-D)+(F+G-P)$
$B(1, 1)$	$(A_1+F+G-C-D)(F+G-P)$	$-(A_1+F+G-C-D)-(F+G-P)$
$C(0, 1)$	$-(A_1+F+G-C-D)(E+G-P)$	$(A_1+F+G-C-D)-(E+G-P)$
$D(x^*, y^*)$	$-(C+D-A_1-E-G)(A_1+F+G-C-D)(P-E-G)(F+G-P)/(F-E)^2$	0

(1) 讨论局部均衡点 B 的稳定性: 由上述分析可知, 目标策略组合 $(x=1, y=1)$ 为稳定状态, 即 $B(1, 1)$ 的 $\det . J > 0$ 、 $\text{tr} . J < 0$, 得:

$$\begin{cases} F+G > C+D-A_1 \\ F+G > P \end{cases} \tag{11}$$

(2) 讨论局部均衡点 O 、 A 、 C 、 D 的稳定性: 首先讨论 $(A_1+E+G-C-D)$ 与 $(E+G-P)$ 的正负, 共存在四种情形, 情形 I-IV 下各局部均衡点的稳定性分析结果见表 4。

显然, 情形 I、II、III 均只有一个演化稳定策略 $B(1, 1)$, 即可以实现所期盼的(达标, 补偿)目标策略成为博弈系统的唯一演化稳定策略; 情形 IV 中 $B(1, 1)$ 并非博弈系

表4 4种情形下各局部均衡点的局部稳定性分析

Table 4 The stability of the partial equilibrium points of the dynamic evolution game theory

均衡点	情形I ($A_1+E+G-C-D>0$, $E+G-P>0$)			情形II ($A_1+E+G-C-D>0$, $E+G-P<0$)			情形III ($A_1+E+G-C-D<0$, $E+G-P>0$)			情形IV ($A_1+E+G-C-D<0$, $E+G-P<0$)		
	det.J	tr.J	稳定性	det.J	tr.J	稳定性	det.J	tr.J	稳定性	det.J	tr.J	稳定性
	$O(0, 0)$	+	+	不稳定	-	±	不稳定	-	±	不稳定	+	-
$A(1, 0)$	-	±	不稳定	-	±	不稳定	+	+	不稳定	+	+	不稳定
$B(1, 1)$	+	-	稳定	+	-	稳定	+	-	稳定	+	-	稳定
$C(0, 1)$	-	±	不稳定	+	+	不稳定	-	±	不稳定	+	+	不稳定
$D(x^*, y^*)$	-	0	鞍点	+	0	鞍点	+	0	鞍点	-	0	鞍点

注：“+”“-”分别表示det.J与tr.J的正负性。

统的唯一演化稳定策略，故舍去。此外，当 $(A_1+E+G-C-D)=0$ 或 $(E+G-P)=0$ 时，情形I~III同样均只有一个演化稳定策略 $B(1, 1)$ 。

所以，在引入协调手段的博弈模型中，太浦河上下游地区（达标，补偿）策略组合是能够成为演化博弈的稳定策略，而当是唯一的稳定策略时需满足不等式组(11)与情形I或情形II或情形III的条件，即为：

$$\begin{cases} F+G>C+D-A_1 \\ E+G\geq C+D-A_1 \text{ 或 } F+G>C+D-A_1 \geq E+G\geq P \\ F+G>P \end{cases} \quad (12)$$

此时，动态博弈系统的稳定性与激励约束力度、补偿金额、水权、上游保护成本与效益等密切相关。调控相应激励约束力度、分担上游保护成本、减轻下游补偿压力等能够有效促进太浦河上下游走向合作保护水资源的道路。

3 博弈视角下太浦河水资源保护协作机制探讨

根据上文对太浦河上下游水资源保护博弈分析可知，为协调利益矛盾和促进合作状态稳定性，需要有“流域机构介入”“激励约束政策”形成外部驱动手段，用来统筹促进上下游积极协作；“生态补偿机制”“断面考核机制”形成内部均衡手段，用来协调均衡上下游水资源保护利益诉求，从而形成太浦河上下游水资源保护协作机制，如图3。

3.1 外部驱动机制

(1) 流域机构介入，统筹上下游规划对接

通过流域管理局的介入，能够对上游吴江与下游嘉善、青浦地区协调合作起到统筹管理、协调引导、提供协商平台的作用。应充分发挥太湖流域管理局在流域水资源保护与管理中的作用，构建上下游流域会商制度，促使上下游地区平等协商，统筹协调上下游规划对接，从而有效协调太浦河吴江与嘉善、青浦地区因河流功能定位需求不一致的矛盾。以太浦河上下游各区县为规划单元，综合考虑上下游的河流功能定位需求及区域特征，制定太浦河水功能分区规划与水资源保护与开发利用规划。合理调整吴江与嘉善、青浦地区产业结构和工业布局，大力推进太浦河沿岸地区工业点源污染治理工作，协助上游吴江地区着重推动纺织产业转型发展、空间布局优化，探索推进吴江区纺织行业循环经济产业园区建设，采用先进生产工艺，实现循环经济、节能减排，与下游嘉

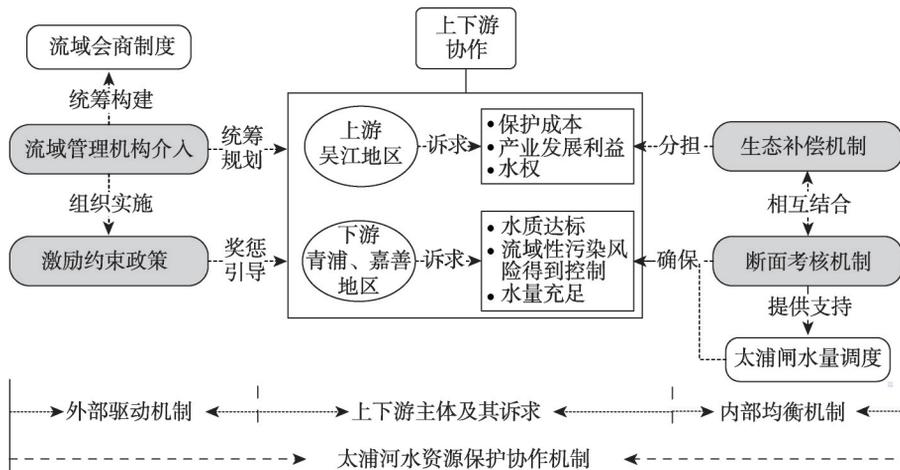


图3 博弈视角下太浦河上下游水资源保护协作机制框架

Fig. 3 The framework of cooperative protection mechanism between the upstream and downstream regions in the Taipu River Basin based on the game theory

善、青浦水源地建设形成对接。同时鼓励下游嘉善、青浦水源地保护区内企业及居民加强水资源保护，给予相应的补偿措施，使其成为水资源保护的积极参与者，加快流域“清水走廊”建设。

(2) 激励约束引导，调动上下游协作积极性

激励约束政策作为外部推动力，形成以奖惩分明的政策机制，充分调动吴江与嘉善、青浦地区加强太浦河水资源合作保护的积极性和主动性。基于博弈分析结果，可通过调控激励约束力度均衡太浦河上游吴江地区因开展水资源保护的成本投入、可发展机会及水权损失，以及减轻下游嘉善、青浦地区生态补偿支付压力。因此，由太湖流域管理局组织上下游各地区主管部门，根据“谁污染、谁治理”与“谁受益、谁付费”的原则^[29]，探索实行“奖励水质改善”“惩罚水质下降”“奖励积极补偿”“惩罚消极补偿”的奖惩机制，并结合“断面考核机制”，确定科学合理的考核依据及奖惩金额等。

在奖励机制下，太湖流域管理局通过实施中央补贴、水资源保护专项资金等政策，一方面对上游吴江地区积极开展水资源保护、促进水质改善的工作进行奖励，分担吴江地区开展水资源保护的成本投入，使其进行水资源保护的效益大于不进行保护的效益，保证其开展保护的积极性和稳定性^[6]；另一方面，对下游嘉善、青浦地区积极实施生态补偿的工作进行奖励，以减轻下游嘉善、青浦地区转移支付资金的压力。在惩罚机制下，若上游吴江地区未能针对太浦河水质进行积极有效的保护，使得水质低于断面考核标准时；或者若下游嘉善、青浦地区未能积极实行横向生态补偿，承担上游水资源保护成本时，则太湖流域管理局应对上下游地区予以处罚，处罚资金纳入水资源保护专项资金，用以太浦河水资源保护工作中。

3.2 内部均衡机制

(1) 引入生态补偿，弥补上游吴江经济利益损失

生态补偿机制作为上下游合作的内部协调手段，可以有效弥补上游吴江地区经济发展与水权损失，化解上下游利益矛盾。在《关于建立健全长江经济带生态补偿与保护长

效机制的指导意见》(财预〔2018〕19号)等政策背景下,探讨合理的太浦河跨界生态补偿机制。在太浦河省际协商的基础上,确定合理的补偿主体;结合太浦河交界断面水质目标考核,确定补偿依据;综合考虑上游吴江地区保护成本及下游嘉善、青浦地区应承担的部分,计算科学合理的补偿标准;尝试为上游吴江地区提供除经济补偿外的技术补偿、实物补偿等多元化的补偿方式。同时,吴江地区在得到生态补偿或政策奖励时,应着重于该区域水污染防治、技术改造、产业转型升级等方面。致力于加强上游吴江地区航运监管、岸线利用优化、农业面源污染控制及镉污染风险防控等,升级改造区域内污水处理厂,控制污染物减量排放,并推动区域内纺织产业转型升级发展,探索生态型、循环型纺织产业建设等。

(2) 建立断面考核,确保下游嘉善、青浦取水安全

建立太浦河断面水质考核机制,能够反映太浦河水资源保护成效,形成水资源保护倒逼机制,确保下游嘉善、青浦取水安全。在上下游会商平台的基础上,建立科学合理的太浦河断面评价考核体系。其中,考核评价指标应结合太浦河地区污染特性,以体现环境风险的镉浓度为重要指标,然后选取DO、COD及NH₃-N等常规水质指标;考核评价结果反映上游吴江地区水环境保护成效,形成警示、倒逼的作用,促进太浦河水环境质量的提高,考核结果并与横向生态补偿机制、奖励惩罚机制挂钩,为横向转移支付与奖励惩罚政策提供依据。此外,在断面考核体系的基础上,完善交界断面水质实时监测系统,根据实时水质监测数据,为太浦闸水量调度提供数据支撑。充分发挥太浦河水资源保护省际协作机制作用,下游遇突发水环境风险时,及时通报太湖流域管理局,进而合理地调控太浦闸下泄流量予以稀释,筑起下游水源地取水安全防线。

4 结论

通过对比分析太浦河上下游地区利益诉求,基于博弈视角探讨了协调太浦河上下游利益矛盾、激励上下游合作的协作机制。主要结论如下:

(1) 太浦河作为长三角地区典型跨界河流,上游吴江与下游嘉善、青浦地区因水资源保护而引起的“河流功能定位”“镉污染风险”“水资源产权”及“经济利益”等方面利益诉求矛盾突出。本文将“流域机构介入”“激励约束政策”外部驱动手段及“生态补偿”“断面水质考核”内部均衡手段引入博弈模型中,实现了博弈系统向(达标,补偿)的策略演化,达成了太浦河上下游水资源协作保护。

(2) 基于博弈稳定性分析结果,动态博弈系统的稳定性与激励约束力度、补偿金额、水权、上游吴江地区保护成本与效益等密切相关。为促进演化博弈模型趋向(达标,补偿)稳定策略,应组织建立合理的生态补偿机制与奖励惩罚机制,分担上游吴江地区开展水资源保护的投入成本和水权损失,并减轻下游嘉善、青浦地区横向补偿的压力,激励上下游参与协作的积极性和稳定性。

(3) 基于博弈结果构建了太浦河上下游水资源保护协作机制。在外部驱动机制下,流域机构统筹规划对接,实施奖惩分明的激励约束政策,协调了太浦河上下游因河流功能定位需求不一致的矛盾,并调动了上下游加强水资源合作保护的积极性和主动性;在内部均衡机制中,建立生态补偿与断面考核机制,弥补了上游吴江地区水权、产业发展及保护成本等利益损失,并促进太浦河水质达标,保障下游嘉善、青浦地区取水安全。

有效均衡了上下游水资源保护利益诉求,激励上下游达成成本共担、利益共享的水资源保护协作机制。

本文构建的太浦河上下游水资源保护协作机制,可为加快推进长三角一体化、推动长三角地区协同保护生态环境、建设流域重要“清水走廊”等提供一定的理论参考。由于流域管理问题的协调涉及到社会、环境、经济等多个方面,本文主要是针对跨界流域水资源保护协作机制理论框架进行了探讨,后续研究有待于翔实的数据加以支撑。

参考文献(References):

- [1] 杨玉川,罗宏,张征,等.我国流域水环境管理现状.北京林业大学学报:社会科学版,2005,4(1):20-24. [YANG Y C, LUO H, ZHANG Z, et al. Status quo of watershed environment management in China. Journal of Beijing Forestry University: Social Sciences, 2005, 4(1): 20-24.]
- [2] 陈湘满.论流域开发管理中的区域利益协调.经济地理,2002,22(5):525-528. [CHAN X M. The coordination among regional profits in the river basin development and management. Economic Geography, 2002, 22(5): 525-528.]
- [3] 吕添贵,吴次芳,陈美球,等.基于博弈视角的鄱阳湖流域经济协调机制及路径选择.自然资源学报,2014,29(9):1465-1474. [LYU T G, WU C F, CHEN M Q, et al. Study on path selection of economic coordination mechanism in Poyang Lake Basin based on game theory. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1465-1474.]
- [4] 李浩,刘陶,黄薇.跨界水资源冲突动因与协调模式研究.自然资源学报,2010,25(5):705-712. [LI H, LIU T, HUANG W. Analysis of motivation and mediation framework for trans-boundary water conflict. Journal of Natural Resources, 2010, 25(5): 705-712.]
- [5] 沈大军,王浩,蒋云钟.流域管理机构:国际比较分析及对我国的建议.自然资源学报,2004,19(1):86-95. [SHEN D J, WANG H, JIANG Y Z. Riverbasin management organization: An international comparison and suggestions on China. Journal of Natural Resources, 2004, 19(1): 86-95.]
- [6] 何伟军,蔡艳伟,袁亮.跨区域生态合作利益冲突的动态演化博弈分析.环境科学与技术,2015,38(4):193-199. [HE W J, CAI Y W, YUAN L. Dynamic evolutionary game analysis of interest conflict in trans-regional ecological protection cooperation. Environmental Science & Technology, 2015, 38(4): 193-199.]
- [7] 张维迎.博弈论与信息经济学.上海:上海三联书店,2004. [ZHANG W Y. Game Theory and Information Economics. Shang: Shanghai SDX Joint Publishing Company, 2004.]
- [8] MADANI K. Game theory and water resources. Journal of Hydrology, 2010, 381(3-4): 225-238.
- [9] KUCUKMEHMETOGLU M. An integrative case study approach between game theory and Pareto frontier concepts for the transboundary water resources allocations. Journal of Hydrology, 2012, 450-451: 308-319.
- [10] CABO F, ERDLLENBRUCH K, TIDBALL M. Dynamic management of water transfer between two interconnected river basins. Resource and Energy Economics, 2014, 37: 17-38.
- [11] 谭东焜.太湖流域水环境保护利益相关者博弈研究.南京:南京大学,2016. [TAN D X. Game theory study on stakeholders of water environment protection in Taihu Lake Basin. Nanjing: Nanjing University, 2016.]
- [12] ANSINK E, RUIJS A. Climate change and the stability of water allocation agreements. Environmental and Resource Economics, 2008, 41(2): 249-266.
- [13] WANG L, FANG L, HIPEL K W. Basin-wide cooperative water resources allocation. European Journal of Operational Research, 2008, 190(3): 798-817.
- [14] SHI G M, WANG J N, ZHANG B, et al. Pollution control costs of a transboundary river basin: Empirical tests of the fairness and stability of cost allocation mechanisms using game theory. Journal of environmental management, 2016, 177: 145-152.
- [15] 赖苹,曹国华,朱勇.基于合作博弈的流域水污染治理成本分摊研究.生态与农村环境学报,2011,27(6):26-31. [LAI P, CAO G H, ZHU Y. Cost sharing of watershed water pollution abatement based on cooperative game. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(6): 26-31.]
- [16] 曹洪华,景鹏,王荣成.生态补偿过程动态演化机制及其稳定策略研究.自然资源学报,2013,28(9):1547-1555.

- [CAO H H, JING P, WANG R C. The dynamic evolution mechanism of ecological compensation and its stable strategy research. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(9): 1547-1555.]
- [17] 胡振华, 刘景月, 钟美瑞, 等. 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. *经济地理*, 2016, 36(6): 42-49. [HU Z H, LIU J Y, ZHONG M R, et al. Interests balance of trans-boundary river basin ecological compensation based on evolutionary game theory: Taking Lijiang Basin as a case. *Economic Geography*, 2016, 36(6): 42-49.]
- [18] 潘峰, 西宝, 王琳. 地方政府间环境规制策略的演化博弈分析. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(6): 97-102. [PAN F, XI B, WANG L. Evolutionary game analysis of environmental regulation strategy between local governments. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(6): 97-102.]
- [19] 李胜, 陈晓春. 基于府际博弈的跨行政区流域水污染治理困境分析. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(12): 108-113. [LI S, CHEN X C. Governance dilemma of trans-district water pollution: an intergovernmental game perspective. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(12): 108-113.]
- [20] 易志斌. 国内跨界水污染治理研究综述. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(2): 109-113. [YI Z B. Review of governance research on trans-boundary water pollution in China. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2013, 24(2): 109-113.]
- [21] 黄德春, 华坚, 周燕萍. 长三角跨界水污染治理机制研究. 南京: 南京大学出版社, 2010. [HUANG D C, HUA J, ZHOU Y P. Study on The Mechanism of Trans-boundary Water Pollution Control in the Yangtze River Delta. Nanjing: Nanjing University Press, 2010.]
- [22] 赖苹. 基于合作博弈理论的跨行政区流域水污染治理机制研究. 重庆: 重庆大学, 2015. [LAI P. Research on water pollution abatement mechanism of trans-district river basin based on cooperative games theory. Chongqing: Chongqing University, 2015.]
- [23] 孙嘉夏. 上海“潜在水源地”锑超标, 苏州吴江印染企业停、限产. <http://www.nbd.com.cn/articles/2014-08-11/855099.html>, 2014-08-11. [SUN J X. "Potential water sources" in Shanghai excess antimony, and the production of printing and dyeing enterprises in Wujiang district, Suzhou city, was discontinued and restricted. <http://www.nbd.com.cn/articles/2014-08-11/855099.html>, 2014-08-11.]
- [24] 孙晓宇, 杨雾晨, 唐晓迪, 等. 太浦河流域锑污染环境风险评估. *环境保护科学*, 2017, 43(3): 120-124. [SUN X Y, YANG W C, TANG X D, et al. Environmental risk assessment of antimony pollution in Taipu River Basin. *Environmental Protection Science*, 2017, 43(3): 120-124.]
- [25] 戴晶晶, 陈红, 彭焱梅, 等. 太浦闸水量水质联合调度对金泽水库水质影响. *水利水电工程学报*, 2017, (4): 20-27. [DAI J J, CHEN H, PENG Y M, et al. Impacts of water quantity and quality joint operation for Taipu sluice on water quality in Jinze Reservoir. *Hydro-Science and Engineering*, 2017, (4): 20-27.]
- [26] 牛小丹. 基于上下游合作的跨界河流水环境保护研究: 以太湖流域太浦河为例. 上海: 华东师范大学, 2018. [NIU X D. Study on transboundary river environment protection based on the cooperation of the upstream and downstream: A case study of Taipu River in Taihu Basin. Shanghai: East China Normal University, 2018.]
- [27] 李宁, 王磊, 张建清. 基于博弈理论的流域生态补偿利益相关方决策行为研究. *统计与决策*, 2017, 33(23): 54-59. [LI N, WANG L, ZHANG J Q. The decision-making behavior of stakeholders on basin ecological compensation based on game theory. *Statistics & Decision*, 2017, 33(23): 54-59.]
- [28] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics. *Econometrica*, 1991, 59(3): 637-666.
- [29] 葛颜祥, 梁丽娟, 接玉梅. 水源地生态补偿机制的构建与运作研究. *农业经济问题*, 2006, (9): 22-27. [GE Y X, LIANG L J, JIE Y M. Building up a mechanism of ecological compensation for the waterhead region and its operation. *Issues in Agricultural Economy*, 2006, (9): 22-27.]

The cooperation mechanism of water resources protection in trans-boundary river based on game theory: A case study of the Taipu River in the Taihu Lake Basin

YANG Meng-jie^{1,2}, YANG Kai^{1,2}, LI Gen^{1,2}, NIU Xiao-dan^{1,2}

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: The coordination of interests among stakeholders in water resources management for trans-boundary rivers remains to be a challenge. Taking the Taipu River, a typical trans-boundary river in the Taihu Lake Basin, as an example, this paper analyzed the interest demands of stakeholders for water resources protection in the upstream and downstream regions of the Taipu River. Based on the game theory, this paper introduced both external driving forces (Watershed Agency Intervention and Incentive and Restraint Policies) and internal equilibrium measures (Ecological Compensation and Sectional Water Quality Assessment) to explore a cooperation mechanism that can mitigate the conflicts and encourage cooperation between the upstream and downstream regions. The results show that: (1) The game cooperative strategy (Reaching Standard, Compensation) is realized in the game model with the coordination methods. (2) Based on the results of game analysis, the realization of the game strategy (Reaching Standard, Compensation) is closely related to the strength of incentives and constraints, the amount of compensation, water rights, upstream protection costs and benefits. (3) The external driving forces can help to coordinate the function orientation difference of upstream and downstream demands of the Taipu River, and to create the enthusiasm and initiative of protection cooperation of the upstream and downstream regions. The internal equilibrium measures can compensate for the loss of upstream water rights and industrial development interests, making the water quality of the Taipu River to meet the safety standard of the downstream water intake. (4) The coordination mechanism of the water resources protection for the Taipu River was constructed, which provides theoretical and decision-making support to accelerate the coordinated development of the Yangtze River Delta and establish a Clean Water Corridor in the Taihu Lake Basin.

Keywords: water resources protection; cooperation mechanism; game analysis; trans-boundary river; Taipu River