

杨高升, 姜欢, 田贵良, 等. 政府与公众监管下外调水与地方水合规取用的演化博弈[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1051-1062. YANG G S, JIANG H, TIAN G L, et al. Evolutionary game on the compliant use of external water diversion and local water under government regulation and social supervision[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1051-1062. (in Chinese)

政府与公众监管下外调水与地方水 合规取用的演化博弈

杨高升¹, 姜欢¹, 田贵良², 缪岗辉¹

(1. 河海大学商学院, 南京 211100; 2. 河海大学经济与金融学院, 南京 211100)

摘要: 针对调水工程受水区用水户使用外调水意愿不足, 存在过度开采当地地下水或超量使用地表水等违规取水行为的情况, 基于社会共治理念, 考虑引入社会公众监督力量, 借助演化博弈理论, 通过建立地方政府、用水户与社会公众的三方演化博弈模型, 探讨不同情况下地方政府、用水户与社会公众的演化稳定策略以及实现系统稳定的条件, 并通过系统动力学仿真分析研究模型中关键参数对三方利益主体演化策略的影响。结果表明: 政府监管成本、补贴力度、处罚力度、违规取水行为监管发现率以及社会公众监督举报成本是影响三方演化博弈的关键因素。其中, 降低政府监管成本能够显著提升政府监管力度; 提升政府水费补贴和惩罚力度能够促进用水户选择使用外调水, 相较于政府处罚力度, 用水户对于政府补贴力度更加敏感; 降低监督举报成本能够提升社会公众参与监督的意愿。为此, 建议政府从优化监管机制和措施、完善取水奖惩制度与引导公众广泛参与 3 个方面推进调水工程受水区外调水的消纳与本地水的合规取用。

关键词: 政府监管; 社会监督; 合规取水行为; 演化博弈; 系统动力学

中图分类号: TV68; F224.32 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0104

水是基础性自然资源和战略性经济资源, 是生态与环境的控制性要素^[1]。我国水资源总量丰富, 但人均水资源量少且时空分布不均。为缓解重点缺水地区的供需矛盾, 我国先后建成一批调水工程^[2], 其中南水北调工程分为东、中、西 3 条线路, 是世界上规模最大的调水工程, 同时也是我国最典型的重大调水工程^[3]。

南水北调工程规模大、投资大、运行管理难度高, 现有水价是供水成本的客观反映, 考虑配套工程成本后, 受水区终端用水价格更高, 这在一定程度上影响了受水区消纳南水北调水的积极性^[4-5]。特别是南水北调东线工程山东段, 由于受水区外调水价格高于当地地下水或地表水, 用水户受经济利益驱动, 选择使用外调水意愿较弱, 即使在当地可用水资源短缺的情况下, 依旧会采取过度开采地下水或超量使用地表水等方式获取可用水资源^[6-7]。

调水工程受水区用水户的上述违规取水行为不仅容易造成外调水资源的浪费, 同时, 过度开发当地水资源会造成一系列生态环境问题, 制约受水区可持续发展^[4,8-9]。目前调水工程受水区促进外调水消纳和减少本地水违规取用的治理体系仍以政府监管为主^[10-11], 而政府监管行政资源有限, 同时这种治理体系缺乏社会公众监督, 并不能有效约束用水户的违规取水行为以达到长效治理的效果。因此, 分析如何充分发挥政府监管和社会公众监督的作用, 探索调水工程受水区多主体参与的协同治理模式是促进外调水消纳和减少违规取用本地水行为发生的关键。

调水工程受水区用水户无证取水、超取和滥取等违规取水行为属环境违法行为^[12-13]。针对此类问题, 经济学认为, 政府监管是解决环境违法行为负外部性的有效工具, 地方政府的环境监管能力和

收稿日期: 2024-05-27 修回日期: 2024-09-13 网络出版时间: 2024-10-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241010.1522.002>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42371312); 国家社会科学基金后期资助项目(19FJYB029)

作者简介: 杨高升(1966—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士, 主要从事工程经济与工程管理、水资源管理方面研究。E-mail: ygshh@hhu.edu.cn

通信作者: 姜欢(1998—), 男, 宁夏吴忠人, 主要从事工程经济与工程管理、水资源管理方面研究。E-mail: zmjianghuan@163.com

严格程度是决定被监管主体环境行为的关键因素^[14-15]。政府监管研究的核心问题在于如何平衡监管效率和监管成本,学者们^[16-20]通过制定监管成本与监管效果相平衡的指标来确定最优的监管策略。贝克尔从成本收益的角度解释了政府环境监管的有效性,他认为提升惩罚的确定性(逮捕和定罪的可能性)和严厉性(定罪之后惩罚的严重程度)可以降低实施环境违法行为的预期收益,进而减小环境违法行为的发生^[21]。考虑到政府、企业或民众是环境违法行为监管过程中的关键利益主体,由于双方利益诉求不同,彼此间存在特定的博弈关系及博弈行为,目前已有许多学者^[22-28]基于博弈论对两者之间的策略选择开展了研究,结论表明政府监管成本、声誉、环境治理成本以及环境违法行为被发现概率、罚款金额、采用环境保护行为的成本和收益等因素对政府、企业或民众的策略选择有着十分重要的影响。

除政府监管外,部分学者还就社会公众监督对减少环境违法行为和促进环境治理的影响开展了相关研究,发现公众参与可以弥补由政府单方面决策所带来的局限。如:吴力波等^[29]的研究表明,公众环境关注度可有效发挥非正式环境规制的约束作用,激励污染企业环保转型的同时有效督促地方政府严格执行环境规制。Langpap 等^[30]将环境规制变量延伸到对私人活动的影响,通过调查公众对环境污染的诉讼案件,指出公众监督和公共执法作为一种非正式环境规制在美国水污染治理中发挥了显著作用。王建秀等^[31]以 145 家公司数据为样本,通过对社会公众监督与企业环保业绩之间的关联进行分析,发现社会公众通过上访和申诉等方式,可以促使政府部门向污染企业施加压力,从而提高企业的环保业绩。Nakano 等^[32]研究发现,在琵琶湖的治理中,日本政府通过多种途径征求了不同阶层群体的意见和建议,社会公众参与监督在较大程度上推动了流域综合治理的进程。姜国俊等^[33]关于水污染治理中企业社会责任的研究表明,市场上与水污染相关联的企业数量繁多,生产经营领域、地域和方式多样,仅靠政府的单一监督远远不够,必须建立有效的社会监督机制,织密社会主体的多元监督网络,推进水污染治理信息在各监督主体间的公开与共享。

现有研究从不同角度分析政府监管和社会公众监督对企业及民众环境行为的影响,得出许多有价

值的研究结论,但仍存在以下不足:一是对促进调水工程受水区外调水消纳和本地水合规取用问题的关注度不够,尤其是对调水工程受水区用水户取用水行为的研究不足,无法准确识别用水户取用水行为转变的动力来源、作用机制与稳定策略;二是从社会多元共治视角分析政府监管和社会公众监督双重约束下,调水工程受水区用水户取用水行为监管的研究不足,促进外调水消纳和本地水的合规取用,不仅需要政府监管和用水户配合,还需要社会公众监督,通过引入社会公众监督力量,可以构建多元主体参与治理的长效机制。

如何处理促进外调水消纳和本地水合规取用问题中政府、用水户、社会公众参与三方引起的系统复杂性问题,是成功构建多元主体参与治理长效机制的关键。根据以往研究^[34]可知,演化博弈分析是解决利益冲突等复杂系统问题的重要数学方法,应用演化博弈理论对各参与主体行为进行研究的目的是深入探究各参与主体行为演化的动态变化过程,并通过分析其演化方向和最终状态,总结出各主体行为演化规律和影响演化的重要因素。演化博弈分析意义不在于对一次性博弈结果或者短期博弈均衡等的预测,而在于在比较稳定的环境下对政府、用水户以及社会公众间存在的博弈关系长期稳定趋势的分析^[35]。鉴于此,本文提出地方政府监管下社会公众参与监督的协同治理模式,借助演化博弈理论,探讨各参与主体之间的动态博弈,分析演化稳定策略及影响系统稳定的关键因素,并结合系统动力学仿真分析各影响因素对主体行为选择的影响,进而结合实际情况提出相关建议。研究成果旨在减少调水工程受水区用水户违规取用本地水行为的发生,进而为改善受水区生态环境、促进当地可持续发展、发挥调水工程综合效益提供新的治理思路和政策建议,并为我国后续调水工程取水监管机制和政策的制定与实施提供理论依据。

1 问题描述与模型建立

1.1 模型假设与参数设置

假设 1, 博弈模型中的 3 个主体分别是地方政府、当地用水户和社会公众, 博弈参与方具有有限理性, 以自身利益最大化为目标, 会通过观察其他参与方的行为来调整自身行为。在模型说明和假设基础上, 三方演化博弈模型的主要参数和含义见表 1。

表 1 三方演化博弈模型主要参数及含义
Tab. 1 Main parameters and meanings of three-party evolutionary game model

博弈主体	主要参数	含义
地方 政府	x	地方政府选择严格监管的概率
	C_{31}	政府采取严格监管的成本
	C_{32}	政府采取宽松监管的成本
	α_1	政府严格监管下对违规取水行为的发现率
	α_2	政府宽松监管下对违规取水行为的发现率
	C_4	政府为了修复环境而付出的治理成本
	S_1	政府给予用水户的外调水使用补贴
当地用 水户	y	用水户选择使用外调水的概率
	C_1	用水户使用外调水的用水成本
	C_2	用水户违规取用本地水的成本
	R_1	用水户使用外调水时政府获得的环保收益
	P_1	用水户违规取用本地水被政府监管发现后受到的处罚
社会 公众	z	社会公众选择参与监督举报的概率
	C_5	社会公众参与监督举报时所付出的成本
	S_2	社会公众参与监督举报所获得的权利保障收益
	R_2	社会公众所承担的环境损失

假设 2, 在三方演化博弈过程中, 地方政府对用水户的监管策略为{严格监管, 宽松监管}, 所对应概率为 $\{x, 1-x\}$, 其中 $x \in [0, 1]$; 用水户的策略为{使用外调水, 违规取用本地水}, 所对应概率为 $\{y, 1-y\}$, 其中 $y \in [0, 1]$; 社会公众面对用水户违规取水行为的策略为{参与监督举报, 不参与监督举报}, 所对应概率为 $\{z, 1-z\}$, 其中 $z \in [0, 1]$ 。

假设 3, 对用水户而言, 使用外调水的成本为 C_1 , 违规取用本地水的成本为 C_2 , $C_1 > C_2$; 用水户通过使用外调水解决用水需求, 没有采取通过超量开采地下水等方式获取水资源时, 当地生态环境改善的收益为 R_1 ; 用水户采用破坏水环境方式违规取用本地水时, 被地方政府监管发现后所受到的处罚为 P_1 。

假设 4, 对地方政府而言, 采取严格监管的成本为 C_{31} , 此时发现用水户违规取水行为概率为 α_1 ; 采取宽松监管的成本为 C_{32} , 此时发现用水户违规取水行为概率为 α_2 , $\alpha_1 > \alpha_2$; 当用水户违规取用水资源造成生态环境破坏时, 政府为修复环境而付出的治理成本为 C_4 ; 当用水户响应政策号召使用外调水时, 政府给予用水户的水费补贴为 S_1 。

假设 5, 对社会公众而言, 参与监督举报的成本为 C_5 ; 社会公众参与监督举报, 减少了用水户的违

规取水行为, 所处生存环境得到改善的收益为 S_2 ; 社会公众因用水户违规取用本地水造成所处生存环境被破坏的损失为 R_2 。

1.2 模型构建

基于以上假设与参数设置, 得出用水户行为监管过程中政府、用水户和社会公众间的策略组合以及支付收益矩阵见表 2。

表 2 政府、用水户和社会公众间的策略组合及支付收益矩阵
Tab. 2 Strategy combinations and game payoffs matrix among government, water users, and the general public

地方政府	社会公众	用水户	
		使用外调水 y	违规取用本地水 $1-y$
严格监管 x	参与监督 举报 z	$-C_{31} - S_1 + R_1$	$-C_{31} - C_4 + P_1$
		$-C_1 + S_1$	$-C_2 - P_1$
	$-C_5$	$-C_5 - R_2 + S_2$	
	不参与监督 举报 $1-z$	$-C_{31} - S_1 + R_1$	$-C_{31} - C_4 + \alpha_1 P_1$
$-C_1 + S_1$		$-C_2 - \alpha_1 P_1$	
宽松监管 $1-x$	参与监督 举报 z	0	$-R_2$
		$-C_{32} - S_1 + R_1$	$-C_{32} - C_4 + P_1$
	$-C_1 + S_1$	$-C_2 - P_1$	
	$-C_5$	$-C_5 - R_2 + S_2$	
不参与监督 举报 $1-z$	$-C_{32} - S_1 + R_1$	$-C_{32} - C_4 + \alpha_2 P_1$	
	$-C_1 + S_1$	$-C_2 - \alpha_2 P_1$	
0	$-R_2$		

2 演化博弈稳定策略分析

2.1 政府演化稳定策略分析

设 E_{X1} 、 E_{X2} 分别为政府“严格监管”和“宽松监管”的期望收益, E_X 为政府的平均期望收益, 则:

$$E_{X1} = y(-C_{31} - S_1 + R_1) + z(1-y)(-C_{31} - C_4 + P_1) + (1-z)(1-y)(-C_{31} - C_4 + \alpha_1 P_1) \quad (1)$$

$$E_{X2} = y(-C_{32} - S_1 + R_1) + z(1-y)(-C_{32} - C_4 + P_1) + (1-z)(1-y)(-C_{32} - C_4 + \alpha_2 P_1) \quad (2)$$

$$E_X = xE_{X1} + (1-x)E_{X2} \quad (3)$$

由此可得, 地方政府复制动态方程为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{X1} - E_X) = x(1-x)[C_{32} - C_{31} + (1-y)(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1] \quad (4)$$

对 $F(x)$ 求导可得:

$$F'(x) = (1-2x)[C_{32} - C_{31} + (1-y)(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1] \quad (5)$$

令 $F(x) = 0$, 可得到系统 3 个稳定点, 即 $y^* = \frac{(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1 - C_{31} + C_{32}}{(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1}$, $x = 0$, $x = 1$ 。

当 $y = y^*$ 时, 此时无论 x 取何值, 系统均能达到稳定状态, 即地方政府无论选择“严格监管”还是“宽松监管”, 其策略选择均不会随着时间的推移而发生变化。

当 $y \neq y^*$ 时, $x = 0$ 或 $x = 1$ 是系统的稳定状态。

当 $y < y^*$ 时, $F'(x)|_{x=0} > 0$, $F'(x)|_{x=1} < 0$, 此时, $x = 1$ 为演化策略稳定点, 地方政府会选择“严格监管”。这表明, 当用水户选择使用外调水的意愿不足且呈下降趋势时, 容易造成环境破坏, 地方政府会加大对用水户的监管力度。

当 $y > y^*$ 时, $F'(x)|_{x=0} < 0$, $F'(x)|_{x=1} > 0$, 此时, $x = 0$ 为演化稳定策略, 地方政府会选择“宽松监管”。这表明, 当用水户选择使用外调水的意愿强烈且呈上升趋势时, 地方政府会降低对用水户的监管力度。

2.2 用水户演化稳定策略分析

设 E_{Y1} 、 E_{Y2} 分别为用水户“使用外调水”和“违规取用地方水”的期望收益, E_Y 为用水户的平均期望收益, 则:

$$E_{Y1} = S_1 - C_1 \quad (6)$$

$$E_{Y2} = -x(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1 + (z\alpha_2 - z - \alpha_2)P_1 - C_2 \quad (7)$$

$$E_Y = yE_{Y1} + (1-y)E_{Y2} \quad (8)$$

由此可得, 用水户复制动态方程为

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{Y1} - E_Y) = y(1-y)[(C_2 - C_1 + S_1) + x(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1 - (z\alpha_2 - z - \alpha_2)P_1 + C_2] \quad (9)$$

对 $F(y)$ 求导可得

$$F'(y) = \frac{dF(y)}{dy} = (1-2y)[z(S_1 - C_1) + x(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1 - (z\alpha_2 - z - \alpha_2)P_1 + C_2] \quad (10)$$

令 $F(y) = 0$, 可得到系统 3 个稳定点, 即 $z^* = \frac{x(\alpha_2 - \alpha_1) - \alpha_2 P_1 - C_2}{C_2 - C_1 + S_1 - x(\alpha_1 - \alpha_2)P_1 - (\alpha_2 - 1)P_1}$, $y = 0$, $y = 1$ 。

当 $z = z^*$ 时, 此时无论 y 取什么值, 系统均能达到稳定状态, 即用水户无论选择“使用外调水”还是“违规取用本地水”, 其策略选择均不会随着时间的推移而发生变化。

当 $z \neq z^*$ 时, $y = 0$ 或 $y = 1$ 是系统的稳定状态。

当 $z < z^*$ 时, $F'(y)|_{y=0} < 0$, $F'(y)|_{y=1} > 0$, 此时, $y = 0$ 为演化稳定策略, 当地用水户会选择“违规取用本地水”。这表明, 当社会公众参与监督举报的意愿不足且呈下降趋势时, 用水户违规取用水行为

被发现的概率将会减小, 此时用水户倾向于违规取用本地水。

当 $z > z^*$ 时, $F'(y)|_{y=0} > 0$, $F'(y)|_{y=1} < 0$, 此时, $y = 1$ 为演化稳定策略, 当地用水户会选择“使用外调水”。这表明, 当社会公众参与监督举报的意愿强烈并呈上升趋势时, 用水户违规取用水行为被发现的概率将会增大, 此时用水户倾向于使用外调水。

2.3 社会公众演化稳定策略分析

设 E_{Z1} 、 E_{Z2} 分别为社会公众“参与监督举报”和“不参与监督举报”所对应的期望收益, E_Z 为社会公众的平均期望收益, 则:

$$E_{Z1} = S_2 - C_5 \quad (11)$$

$$E_{Z2} = (1-y)R_2 \quad (12)$$

$$E_Z = zE_{Z1} + (1-z)E_{Z2} \quad (13)$$

由此可得, 社会公众复制动态方程为

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(E_{Z1} - E_Z) = z(1-z)[(y-1)R_2 + S_2 - C_5] \quad (14)$$

对 $F(z)$ 求导可得

$$F'(z) = \frac{dF(z)}{dz} = (1-2z)[(y-1)R_2 + S_2 - C_5] \quad (15)$$

令 $F(z) = 0$, 可得到系统 3 个稳定点, 即 $y^* = \frac{C_5 - S_2 + R_2}{R_2}$, $z = 0$, $z = 1$ 。

当 $y = y^*$ 时, 此时无论 z 取什么值, 系统均能达到稳定状态, 即社会公众无论选择“参与监督举报”还是“不参与监督举报”, 其策略选择均不会随时间推移而发生变化。

当 $y \neq y^*$ 时, $z = 0$ 或 $z = 1$ 是系统的稳定状态。

当 $y < y^*$ 时, $F'(z)|_{z=0} > 0$, $F'(z)|_{z=1} < 0$, 此时, $z = 1$ 为演化稳定策略, 社会公众会选择“参与监督举报”。这表明, 当用水户选择使用外调水的意愿不足且呈下降趋势时, 将会对社会公众生存环境造成危害, 使得社会公众更倾向于参与监督举报。

当 $y > y^*$ 时, $F'(z)|_{z=0} < 0$, $F'(z)|_{z=1} > 0$, 此时, $z = 0$ 为演化稳定策略, 社会公众会选择“不参与监督举报”。这表明, 当用水户选择使用外调水的意愿强烈且呈上升趋势时, 社会公众参与监督举报作用不显著, 因此不参与监督举报将成为社会公众的最优选择。

2.4 演化博弈均衡分析

将政府、用水户以及社会公众的复制动态方程联立, 可以得到演化博弈复制动态方程组。

$$\begin{cases} F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)[C_{32} - C_{31} + \\ (1-y)(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1] \\ F(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)[C_{32} - z(S_1 - C_1) + \\ x(1-z)(\alpha_1 - \alpha_2)P_1 - (z\alpha_2 - z - \alpha_2)P_1 + C_2] \\ F(z) = \frac{dz}{dt} = z(1-z)[(y-1)R_2 + S_2 - C_5] \end{cases} \quad (16)$$

三方演化博弈系统的稳定策略可以通过复制动态方程组的雅可比矩阵稳定性分析来确定,对复制动态方程组求偏微分,可得雅可比矩阵 J 如下:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据 Selten 的研究可知,如果均衡点是演化博弈的稳定策略(ESS),则该均衡点必为纯策略纳什均衡^[36],因此,在三方演化博弈系统中只需分析纯策略均衡点的演化稳定性即可。令复制动态方程组(16)的3个方程 $F(x) = 0, F(y) = 0, F(z) = 0$,则在三维空间 $V = \{(x,y,z) | 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1\}$ 上存在8个纯策略均衡点,分别为 $E_1(0,0,0), E_2(0,0,1), E_3(0,1,0), E_4(0,1,1), E_5(1,0,0), E_6(1,0,1), E_7(1,1,0), E_8(1,1,1)$ 。

利用 Lyapunov 间接法判断三方演化博弈系统均衡点的稳定性:若雅可比矩阵特征值均为负,表明均衡点有较好的渐进稳定性,该均衡点对应演化稳定策略(ESS);若特征值至少存在1个正值,则此均衡点为不稳定点^[37]。将8个纯策略均衡点代入雅可比矩阵 J 中,得到各均衡点的3个特征值见表3。

表3 纯策略均衡点雅可比矩阵特征值

Tab. 3 Eigenvalue of Jacobian matrix of pure strategy equilibrium points

纯策略均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3
$E_1(0,0,0)$	$C_{32} - C_{31} + (\alpha_1 - \alpha_2)P_1$	$S_1 - C_1 + C_2$	$-R_2 + S_2 - C_5$
$E_2(0,0,1)$	$C_{32} - C_{31}$	$S_1 - C_1 + C_2$	$-(-R_2 + S_2 - C_5)$
$E_3(0,1,0)$	$-(C_{32} - C_{31})$	$-(S_1 - C_1 + C_2)$	$S_2 - C_5$
$E_4(0,1,1)$	$-(C_{32} - C_{31})$	$-(S_1 - C_1 + C_2)$	$-(S_2 - C_5)$
$E_5(1,0,0)$	$-(C_{32} - C_{31} + (\alpha_1 - \alpha_2)P_1)$	$S_1 - C_1 + C_2 + (\alpha_1 - \alpha_2)P_1$	$-R_2 + S_2 - C_5$
$E_6(1,0,1)$	$-(C_{32} - C_{31})$	$S_1 - C_1 + C_2$	$-(-R_2 + S_2 - C_5)$
$E_7(1,1,0)$	$C_{32} - C_{31}$	$-(S_1 - C_1 + C_2 + (\alpha_1 - \alpha_2)P_1)$	$S_2 - C_5$
$E_8(1,1,1)$	$C_{32} - C_{31}$	$-(S_1 - C_1 + C_2)$	$-(S_2 - C_5)$

系统的演化稳定策略取决于博弈参数的取值。在地方政府、用水户和社会公众的三方演化博弈模型中,结合实际情况,可知 $C_{31} > C_{32}$,由于该模型参

数众多且较为复杂,为了便于描述和讨论,分3种情形对各均衡点的稳定性进行分析,结果见表4。

表4 3种情形下均衡点稳定性分析

Tab. 4 Stability analysis of the equilibrium points under three scenarios

均衡点	情形1				情形2				情形3			
	λ_1	λ_2	λ_3	稳定性	λ_1	λ_2	λ_3	稳定性	λ_1	λ_2	λ_3	稳定性
$E_1(0,0,0)$	+	±	±	不稳定点	+	±	-	不稳定点	-	±	+	不稳定点
$E_2(0,0,1)$	-	+	±	不稳定点	-	-	+	不稳定点	-	-	-	ESS
$E_3(0,1,0)$	+	±	+	不稳定点	+	±	-	不稳定点	+	+	+	不稳定点
$E_4(0,1,1)$	+	-	-	不稳定点	+	-	+	不稳定点	+	+	-	不稳定点
$E_5(1,0,0)$	-	±	±	不稳定点	-	+	-	不稳定点	+	-	+	不稳定点
$E_6(1,0,1)$	+	+	±	不稳定点	+	-	+	不稳定点	+	-	-	不稳定点
$E_7(1,1,0)$	-	±	+	不稳定点	-	-	-	ESS	-	+	+	不稳定点
$E_8(1,1,1)$	-	-	-	ESS	-	±	+	不稳定点	-	+	-	不稳定点

情形1: $C_{31} - C_{32} < (\alpha_1 - \alpha_2)P_1$,即政府严格监管策略下扣除罚金收益后的监管成本小于政府

宽容监管策略下扣除罚金收益后的监管成本; $C_2 + P_1 > C_1 - S_1$,即政府补贴后用水户使用外调水

的成本小于违规取用本地水成本与违规取用水行为被社会公众举报后受到的罚金之和; $S_2 > C_5$, 即社会公众参与监督举报的成本小于其参与监督举报获得的权利保障收益。此时均衡点 $E_8(1,1,1)$ 是系统演化稳定策略, 即地方政府选择“严格监管”, 用水户选择“使用外调水”, 社会公众选择“参与监督举报”。

情形 2: $C_{31} - C_{32} < (\alpha_1 - \alpha_2)P_1$, 即政府严格监管策略下扣除罚金收益后的监管成本小于政府宽容监管策略下扣除罚金收益后的监管成本; $C_2 + \alpha_1 P_1 > C_1 - S_1$, 即政府补贴后用水户使用外调水的成本小于违规取用本地水成本与违规行为被政府严格监管发现后受到的罚金之和; $S_2 < C_5$, 即社会公众参与监督举报的成本大于其参与监督举报获得的权利保障收益。此时均衡点 $E_7(1,1,0)$ 是系统演化稳定策略, 即地方政府选择“严格监管”, 用水户选择“使用外调水”, 社会公众选择“不参与监督举报”。

情形 3: $C_{31} - C_{32} > (\alpha_1 - \alpha_2)P_1$, 即政府严格监管策略下扣除罚金收益后的监管成本大于政府宽容监管策略下扣除罚金收益后的监管成本; $C_2 + P_1 < C_1 - S_1$, 即政府补贴后用水户使用外调水的成本大于违规取用本地水成本与违规行为被社会公众举报后受到的罚金之和; $S_2 > C_5 + R_2$, 即社会公众参与监督举报获得的权利保障收益大于其受

到的环境破坏损失与参与监督举报的成本之和。此时均衡点 $E_2(0,0,1)$ 是系统演化稳定策略, 即地方政府选择“宽松监管”, 用水户选择“违规取用本地水”, 社会公众选择“参与监督举报”。

基于上述分析可知, 各参与主体的策略选择在不同条件下进行动态变化, 系统内不同均衡状态的稳健性较弱, 稳定均衡状态受系统各类不同条件限制。其中, 政府监管成本、监管发现率、补贴力度、处罚力度以及社会公众监督举报成本是影响演化博弈稳定均衡状态的关键因素。

3 系统动力学模型与仿真分析

3.1 系统动力学模型建立

为验证系统 3 个演化稳定均衡点的有效性, 并进一步体现主要影响参数变动对演化稳定策略的影响, 使用 Vensim PLE 软件构建用水户取用水行为监管演化博弈系统动力学模型, 绘制系统流图见图 1。模型中有 3 个流位变量, 分别为地方政府严格监管概率 x 、用水户使用外调水概率 y 、社会公众参与监督举报概率 z ; 3 个流率变量, 分别为地方政府监管策略适应度 $F(x)$ 、用水户用水行为策略适应度 $F(y)$ 、社会公众参与监督举报策略适应度 $F(z)$; 6 个辅助变量, 分别对应三方主体采取不同策略的期望收益函数, 即 E_{x1} 、 E_{x2} 、 E_{y1} 、 E_{y2} 、 E_{z1} 、 E_{z2} 。

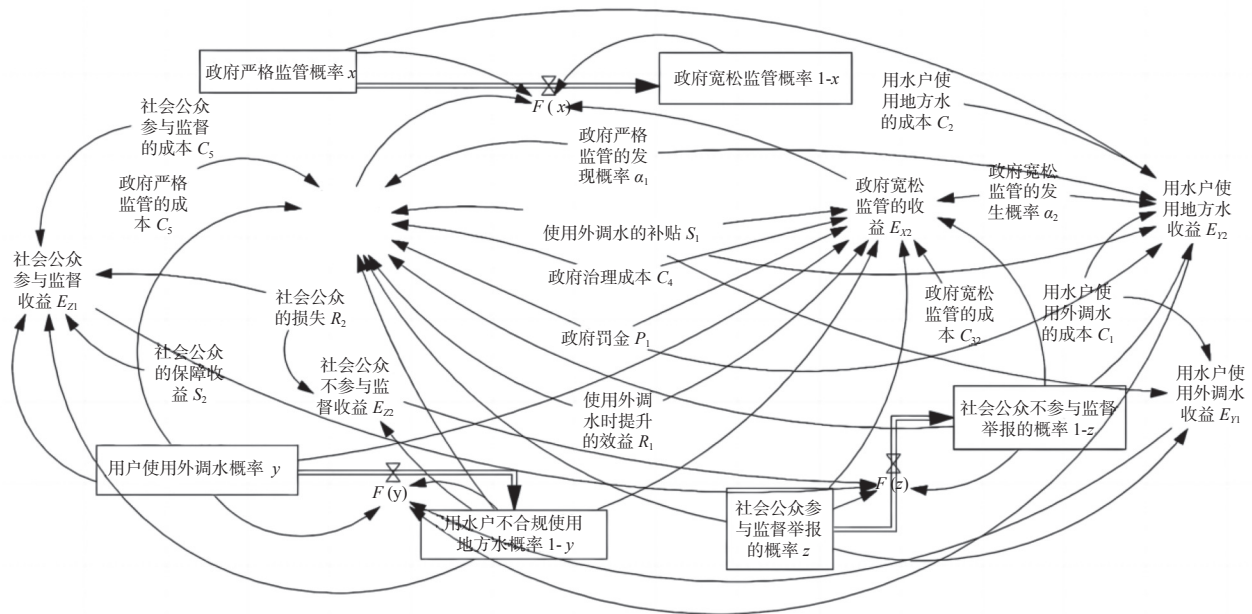


图 1 用水户取用水行为监管的系统动力学模型

Fig. 1 System dynamics model for the regulation of water users' abstraction behaviour

3.2 模型仿真分析

结合文献^[38]中数值设定的方式, 对 Vensim

PLE 软件基本参数设置如下: 仿真初始时间 INITIAL TIME=0, 结束时间 FINAL TIME=10, 步长

TIME STEP=0.125, 时间单位为月。下述各分析演化图的横坐标 t 表示时间, 单位为月; 纵坐标 P 表示不同情景下政府严格监管、用水户使用外调水、社会公众参与监督举报的概率, 且假定初始概率 P 值为 0.5。根据演化稳定均衡条件, 并综合考虑实际情况与相关专家意见, 本文 3 种情形下模型参数的初始赋值见表 5, 仿真结果见图 2、图 3、图 4。

表 5 3 种情形下模型参数初始赋值

Tab. 5 Initial assignment of model parameters for the three scenarios

参数	情形1初始值	情形2初始值	情形3初始值
C_1	6	6	6
C_2	5	5	3
R_1	2	2	2
P_1	2	2	2
C_{31}	5	5	6
C_{32}	4	4	4
α_1	0.8	0.8	0.8
α_2	0.2	0.2	0.2
C_4	1	1	1
S_1	2	2	2
C_5	4	7	2
S_2	3	3	6
R_2	1	1	1

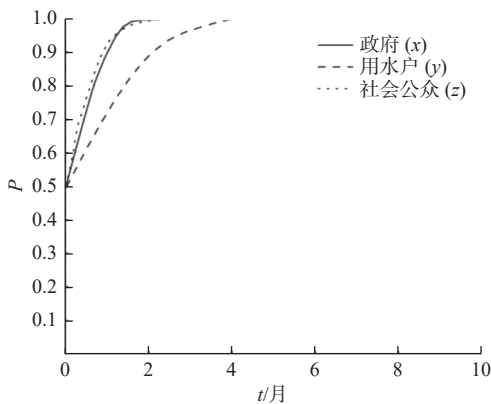


图 2 情形 1 均衡点 $E_8(1,1,1)$ 稳定性检验

Fig. 2 Stability test of equilibrium point $E_8(1,1,1)$ for case 1

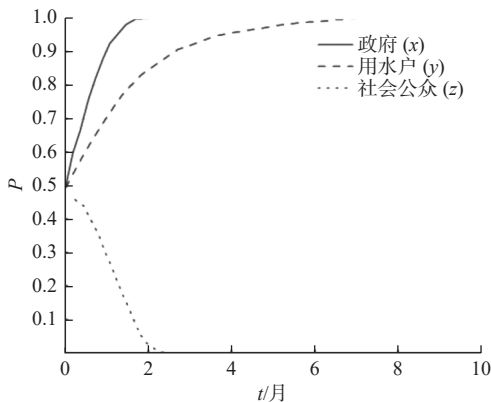


图 3 情形 2 均衡点 $E_7(1,1,0)$ 稳定性检验

Fig. 3 Stability test of equilibrium point $E_7(1,1,0)$ for case 2

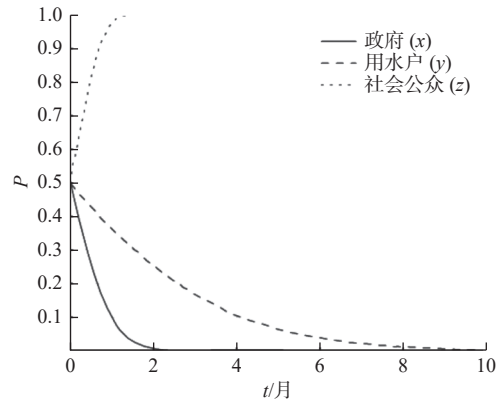


图 4 情形 3 均衡点 $E_2(0,0,1)$ 稳定性检验

Fig. 4 Stability test of equilibrium point $E_2(0,0,1)$ for case 3

根据图 2、图 3 仿真结果可知, 当用水户选择使用外调水的概率较低时, 无论社会公众参与监督举报的概率是逐渐趋向于 1 还是逐渐趋向于 0, 用水户在面临政府严格监管概率迅速增大且先迫近于 1 的情况下, 使用外调水的意愿都将逐步提升, 系统最终稳定于两种状态 $E_8(1,1,1)$ 或 $E_7(1,1,0)$, 即政府严格监管、用水户使用外调水、社会公众参与监督举报或政府严格监管、用水户使用外调水、社会公众不参与监督举报。

根据图 4 仿真结果可知, 当用水户选择使用外调水的概率较低时, 为促使用户选择使用外调水, 社会公众将迅速提升参与监督举报的概率, 而地方政府由于采取严格监管的成本较高, 选择严格监管策略的概率将逐步减小, 此时用水户在面临政府严格监管的压力逐步减小, 仅存在社会公众监督举报的情况下, 选择使用外调水的意愿将逐渐减弱, 系统最终稳定于状态 $E_2(0,0,1)$, 即政府宽松监管、用水户违规取用本地水、社会公众参与监督举报。

3.3 外部变量对主体策略影响的仿真分析

对演化博弈模型的稳定均衡结果及相应条件分析可以发现, 系统演化稳定均衡结果受到参数取值范围影响, 参数值的变化将会影响参与主体的策略选择。下面采用控制变量法, 研究分析主要参数变化对演化结果的影响。

政府监管成本之差 ΔC 对政府行为演化的影响。改变政府严格监管与宽松监管间的成本差, 分别取 $\Delta C = 1, 2, 3, 4$ 进行仿真, 可得政府监管策略的演化路径仿真结果见图 5。由图 5 可知, 随着政府严格监管与宽松监管间成本差 ΔC 的增加, 政府趋向于严格监管策略的速度放缓, 并且当成本差 ΔC 大于一定值时, 政府会选择宽松监管策略。

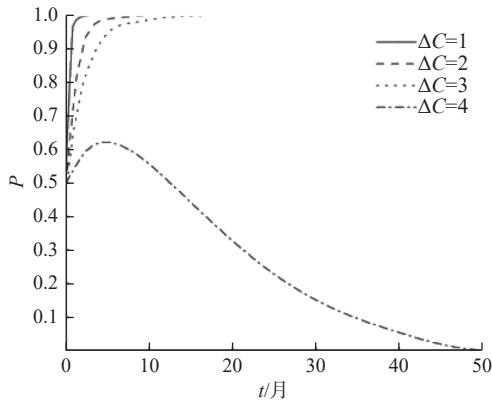


图 5 政府监管成本差对政府行为的影响
Fig. 5 Impact of government supervision cost difference on government behavior

对上述演化结果分析可知,政府监管力度受政府监管成本的影响。政府严格监管的目的是促使用水户使用外调水,遏制违规取用本地水的行为,这一方面可以降低由于环境破坏政府承担的环境治理成本,减少财政支出;另一方面也可以改善当地民众的生存环境,获得环境效益。但基于现实情况,政府监管力度受到人、财、物等资源投入的约束,这些资源的投入体现了政府监管的成本,因此,只有将严格监管的成本控制在一定可接受范围内,政府才能更加积极地采取严格监管策略。

政府处罚力度 P_1 和补贴力度 S_1 对用水户行为的影响。改变政府处罚力度,分别取 $P_1 = 1, 3, 5$ 进行仿真,可得用水户行为策略的演化路径仿真结果见图 6。由图 6 可知,随着政府处罚力度 P_1 的增加,用水户由违规取用本地水的策略改变为选择使用外调水的策略:当 $P_1 \leq 1$ 时,用水户选择违规取用本地水;当 $P_1 > 1$ 时,用水户选择使用外调水,并且随着政府处罚力度的增加,用水户选择使用外调水的策略演化速度会加快。改变政府外调水使用补贴力度,分别取 $S_1 = 2, 4, 6$ 进行仿真,可得用水户行为策略的演化路径仿真结果见图 7。由图 7 可知,随着政府补贴 S_1 的增加,用水户由违规取用本地水的策略改变为选择使用外调水的策略:当 $S_1 \leq 2$ 时,用水户选择违规取用本地水;当 $S_1 > 2$ 时,用水户选择使用外调水,并且随着补贴力度的增加,用水户选择使用外调水的策略演化速度会加快。

由图 6 和图 7 比较可知,政府处罚力度 P_1 和补贴力度 S_1 对用水户策略的影响具有相似性。增加政府处罚力度可以提升用水户违规取用本地水的机会成本,而增大外调水使用补贴力度可以降低用水户选择外调水的使用成本,增大政府补贴和处罚

力度都可以促使用户选择使用外调水,相比于政府处罚力度,用水户对政府补贴力度的敏感性更高。对上述演化结果分析可知,政府在对用水户用水行为进行严格监管的同时,应该对违规取用水行为进行合理惩罚,同时对积极使用外调水的用水户应给予外调水使用补贴,提升其长期使用外调水的意愿,减少违规取用本地水行为的发生。

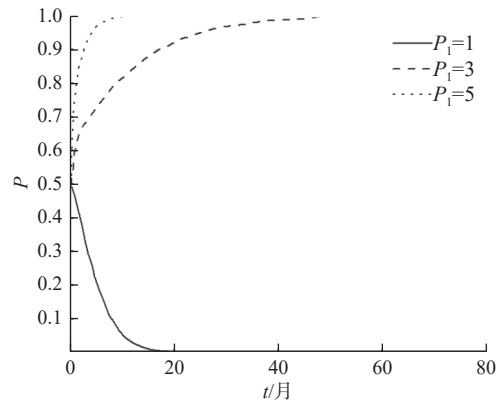


图 6 政府处罚力度对用水户行为演化的影响
Fig. 6 Impact of government punishment on the behavior evolution of water users

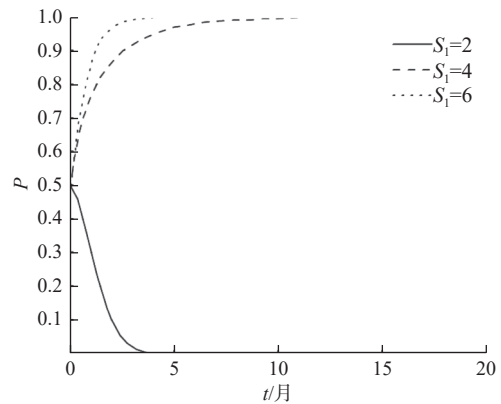


图 7 政府补贴力度对用水户行为演化的影响
Fig. 7 Impact of government subsidies on the behavior evolution of water users

违规取用水行为被发现概率 α 对用水户行为演化的影响。政府严格监管时发现概率 α_1 , 宽松监管时发现概率 α_2 , 恒有 $\alpha_1 > \alpha_2$, 改变 α_1 、 α_2 的值, 分别取 $\alpha_1 = 0.6, 0.7, 0.8$ 和 $\alpha_2 = 0.2, 0.3, 0.4$ 进行仿真, 可得用水户行为策略的演化路径仿真结果见图 8、图 9。由图 8 可知, 随着 α_1 值的增加, 用水户策略选择向使用外调水方向演化, 并且 α_1 值越大, 策略演化速度越快。由图 9 可知, 随着 α_2 值的减小, 用水户策略选择向违规取用本地水的方向演化, 并且 α_2 值越小, 演化速度越快。

对上述演化结果分析可知, 当用水户违规取用水行为所受到的惩罚力度确定后, 用水户违规取用

水行为被发现的概率越高,用水户违规取用本地水的违法风险和成本就越高。因此,对于政府来说,若想提升用水户使用外调水的积极性,需要有效提升政府监管效率和质量,增加政府对违规取用水行为的发现率 α ,加快用水户选择使用外调水策略的演变速度,降低政府监管成本和负担。

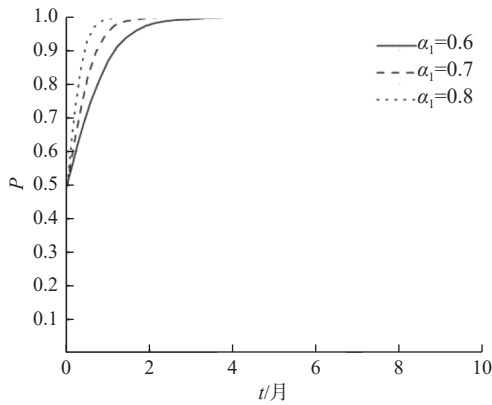


图8 严格监管下发现违规行为概率对用水户行为演化的影响

Fig. 8 Impact of the probability of detecting violations under strict regulation on the evolution of water users' behaviour

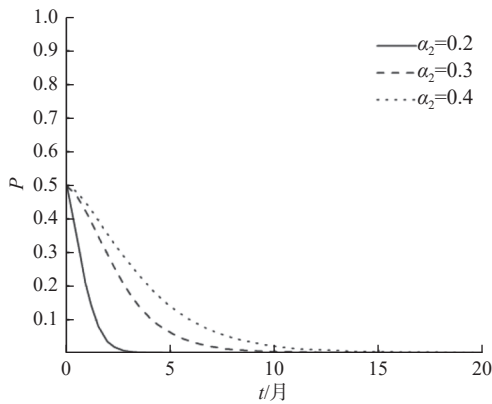


图9 宽松监管下发现违规行为概率对用水户行为演化的影响

Fig. 9 Impact of the probability of detecting violations under lax regulation on the evolution of water users' behaviour

社会公众参与监督举报的成本 C_5 对其行为的影响。改变社会公众参与监督举报的成本,分别取 $C_5 = 1, 2, 3$ 进行仿真,可得社会公众行为策略的演化路径仿真结果见图10。由图10可知,随着参与监督举报成本 C_5 的增大,社会公众策略由参与监督举报转变为不参与监督举报:当 $C_5 < 2$ 时,社会公众选择参与监督举报;当 $C_5 = 2$ 时,社会公众策略先是趋向于选择不参与监督举报,但随着时间推移,策略选择发生转变,并最终达到参与监督举报的均衡稳定状态,说明 $C_5 = 2$ 为临界点;当 $C_5 > 2$ 时,社会公众选择不参与监督举报。

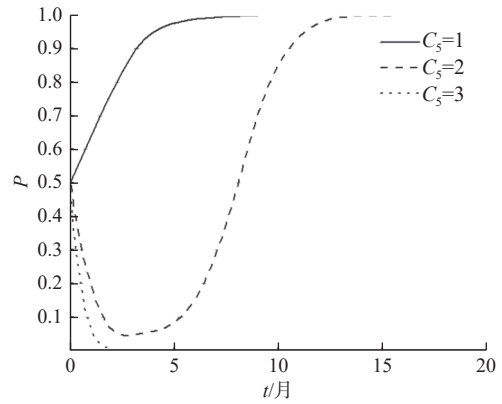


图10 社会公众参与监督举报的成本对其行为演化的影响

Fig. 10 Impact of the cost of public participation in monitoring and reporting on the evolution of their behaviour

对上述演化结果分析可知,对于社会公众而言,若想提升其参与监督举报的积极性,可以考虑降低社会公众参与监督举报的时间和物质成本,只有当参与监督举报的成本较小时,社会公众才有参与监督举报的意愿。从减少时间成本出发,政府要提升公众参与监督举报途径的丰富性和便捷性,缩减社会公众参与监督举报的时间消耗和过程操作;从降低物质成本出发,政府可以适当向参与监督举报的社会公众提供奖励或额外的激励措施,激发社会公众参与监督举报的积极性。

4 结论与建议

本文在调水工程受水区用水户取用水行为政府单独监管的基础上,提出地方政府监管下社会公众参与监督举报的协同治理模式。通过构建地方政府、用水户和社会公众的三方演化博弈模型,对三方的利益关系、稳定均衡状态以及策略选择影响因素进行分析,并以系统动力学理论为基础,利用数值仿真对三方博弈系统的策略演变过程及主要参数对主体行为策略的影响进行了研究,主要结论如下:

政府对用水户的行为起引导和约束作用。政府监管成本是影响政府监管力度的重要影响因素,当政府严格监管的成本较小时,政府对于采取严格监管策略的意愿较高,随着监管成本的逐步增加,政府采取严格监管策略的意愿会逐步下降,严格监管力度也会随之下降。因此,将政府严格监管的成本控制在合理范围内,是政府履行严格监管职能的关键。

用水户取用水行为受到政府给予的外调水使用补贴、本地水违规取用处罚力度和政府监管发现违

规取水行为成功率 3 个方面的影响。政府补贴力度以及处罚力度的增加,会提升用水户使用外调水的意愿,但相较于政府处罚力度,用水户对于政府补贴力度更加敏感,合理的奖惩机制可以有效降低用水户违规取用本地水行为的意愿。此外,提升政府监管发现违规取水行为成功率能够增加用水户违规取水成本,降低违规行为的预期收益,从而对其行为产生正向的促进作用。

社会公众参与监督是作为政府单一监管力量的重要补充。参与监督举报的成本对于社会公众策略选择具有重要的影响作用,社会公众在参与监督举报的成本较小时,采取参与监督举报的意愿较高,随着监督举报成本的逐渐增加,参与监督举报行为的意愿逐渐下降。地方政府建立高效便捷的监督举报机制,并提供合理的奖励措施可以有效降低社会公众参与监督举报的成本,提高公众参与监督的意愿,从而达到政府和社会公众协同治理的效果。

基于上述研究结论,为进一步推进调水工程受水区外调水的消纳和本地水的合规取用,提出如下建议:

优化政府监管机制和措施,提升监管效率,降低监管成本:一方面要建立完善的取用水监管机制,对水资源的分配、管理和使用开展全流程、全方位监管;另一方面要加强政府部门间的协调和联动,建立跨部门、跨领域的合作监管机制,定期开展联合执法行动,形成监管合力,避免重复检查和遗漏检查,有效降低政府监管的资源消耗;此外,在监管方式的选择上要重视技术创新与应用,在加强取用水监测设备建设的基础上,可以积极采用物联网、大数据、人工智能等技术手段进行取用水监测和管理,实现取用水行为的精细化控制和自动化监测,提高政府监管发现违规取水行为的成功率。

完善取水奖惩制度,提升违规用水成本,促进外调水消纳:一方面要建立多元化的补贴与奖励制度,充分考虑用水户利益诉求,对积极使用外调水的用水户给予一定的水费补贴,对取用水表现良好的用水户进行表彰和奖励,提升用水户使用外调水的意愿;另一方面要设计合理的惩罚措施,对不同程度的违规取水行为进行分类分级惩处,对严重违规的用水户进行严肃处理并开展动态监管和跟踪记录,坚决遏制违规取水行为的发生。

引导公众广泛参与,建立多元长效监督机制:一

方面要强化宣传和教育作用,提升公众对调水工程和当地水资源保护的重视程度,引导公众自我约束和参与水资源监督管理,强化社会公众监督举报意识,形成水资源合规取用与高效利用的良好社会氛围,减少政府监管的资源投入;另一方面要充分引导和发挥社会公众的监督举报作用,为公众搭建高效、便捷、多样的监督举报渠道,可以通过新媒体等途径设立问题曝光和监督举报平台,简化监督举报流程,减少公众参与监督举报的物质和时间成本,同时要提升监督举报的处理效率和回复速度并做好信息公开,确保公众知情权得到充分保障;此外,还可以通过建立多元化的监督举报奖励机制,提升社会公众参与监督举报的积极性。

参考文献:

- [1] 马海良,郭金暄,贺正齐,等.数字金融对中国用水强度的影响及其机理[J].资源科学,2024,46(1):1-14. DOI: 10.18402/resci.2024.01.01.
- [2] 王志强,李广诚.中国长距离调水工程地质问题综述[J].工程地质学报,2020,28(2):412-420. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-193.
- [3] 谢泽宇,静峥,杨冕.水资源约束缓解与区域经济增长:来自“南水北调”工程的经验证据[J].数量经济技术经济研究,2023,40(9):93-115. DOI: 10.13653/j.cnki.jqte.20230725.007.
- [4] 徐章星,邱晓楠,田贵良,等.南水北调工程通水对受水区农业用水的影响[J].自然资源学报,2024,39(5):1222-1240. DOI: 10.31497/zrzyxb.20240515.
- [5] 吴振,陈华伟,仇钰婷,等.工业多水源综合水价分析[J].人民黄河,2022,44(4):85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.04.017.
- [6] 黄德春,潘星月,贺正齐.基于生态补偿的南水北调后续工程水价研究[J].水电能源科学,2024,42(4):201-204. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20230699.
- [7] 邓志刚,郭培震,乔从恒.德州市南水北调供水存在问题及对策建议[J].海河水利,2022(1):5-8. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2022.01.002.
- [8] 贾绍凤,梁媛.调水工程研究评述与展望[J].地球科学进展,2023,38(3):221-235. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2023.009.
- [9] 许继军,曾子悦.适应高质量发展的南水北调工程水资源配置思路与对策建议[J].长江科学院院报,2021,38(10):27-32. DOI: 10.11988/cjkyb.20210700.
- [10] 张爱静,姚文锋.南水北调工程运行初期水量消纳情况分析[J].中国农村水利水电,2019(9):39-42. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.09.008.
- [11] 陈东初,龚丽,肖俊.完善取水监管政策的对策措

- 施研究 [J]. *科技资讯*, 2021, 19(16): 66-68. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2107-5042-0684.
- [12] 卢瑶, 马真臻, 贺华翔, 等. 基于缺水量与保证率“双控”的水资源优化配置模型及应用 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2023, 54(8): 91-103. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.08.008.
- [13] 国家发展改革委, 水利部, 住房城乡建设部, 等. 国家发展改革委等部门关于进一步加强水资源节约集约利用的意见: 发改环资〔2023〕1193号 [A/OL]. (2023-09-01). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202309/content_6906203.htm.
- [14] WANG R, WIJEN F, HEUGENS P P. Government's green grip: Multifaceted state influence on corporate environmental actions in China [J]. *Strategic Management Journal*, 2018, 39(2): 403-428. DOI: 10.1002/smj.2714.
- [15] 徐琰, 仲艾芬, 郑景仁. 政府行为、企业投机与中国城市绿色发展: 基于“高投入”与“强监管”的比较研究 [J]. *中国人民大学学报*, 2021, 35(3): 69-82. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5420.2021.03.010.
- [16] 张军涛, 李想. 基于协同治理视角的上市公司会计信息披露的演化博弈与实证 [J]. *科学决策*, 2023 (10): 116-128. DOI: 10.3773/j.issn.1006-4885.2023.10.116.
- [17] 谢敬东, 张蕾. 电力市场价格风险动态监管机理研究 [J]. *价格理论与实践*, 2023(8): 71-75. DOI: 10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2023.08.218.
- [18] 王江, 王鹏. 碳数据质量合规与企业寻租监管: 演化博弈视角下第三方核查监管制度的完善研究 [J]. *中国地质大学学报 (社会科学版)*, 2024, 24(2): 75-92. DOI: 10.16493/j.cnki.42-1627/c.20240312.001.
- [19] 孙晋. 互联网金融平台传统监管的局限与法治化改革 [J]. *华东政法大学学报*, 2023, 26(1): 59-71. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4622.2023.01.006.
- [20] 罗兴, 安雪洁, 何奇龙, 等. 政府委托监管与农村合作金融监管“魔咒”的破解 [J]. *农业经济问题*, 2022 (4): 50-61. DOI: 10.13246/j.cnki.iae.20211227.001.
- [21] 何彬. 俘获如何影响环境监管效果: 一个混合研究 [J]. *公共管理与政策评论*, 2023, 12(4): 113-128. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4026.2023.04.009.
- [22] 张治, 郭帆, 刘志明. “双碳”目标下重污染企业漂绿与政府规制的动态博弈分析 [J]. *西安科技大学学报*, 2024, 44(1): 194-202. DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdx.2024.0120.
- [23] 包春兵, 金宗凯, 戎晓霞, 等. 环保刚性约束下中小企业污染共治策略演化博弈分析 [J]. *中国管理科学*, 2023, 31(9): 137-147. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1236.
- [24] 张明, 孙欣然, 宋妍. 中央环保督察与大气污染治理: 基于纵向政府和污染企业的演化博弈分析 [J]. *中国管理科学*, 2023, 31(4): 171-182. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2621.
- [25] 徐浩, 谭德庆. 基于微分博弈的政府企业污染控制与最优环境政策分析 [J]. *运筹与管理*, 2023, 32(7): 107-112. DOI: 10.12005/orms.2023.0224.
- [26] ZHOU K, WANG Q, TANG J. Evolutionary game analysis of environmental pollution control under the government regulation [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 474. DOI: 10.1038/s41598-021-04458-3.
- [27] FAN W, WANG S, GU X, et al. Evolutionary game analysis on industrial pollution control of local government in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113499. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113499.
- [28] FAN B, GUO T, XU R, et al. Evolutionary game research on the impact of environmental regulation on overcapacity in coal industry [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021(1): 5558112. DOI: 10.1155/2021/5558112.
- [29] 吴力波, 杨眉敏, 孙可弼. 公众环境关注度对企业 and 政府环境治理的影响 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(2): 1-14. DOI: 10.12062/cpre.20210625.
- [30] LANGPAP C, SHIMSHACK J P. Private citizen suits and public enforcement: Substitutes or complements? [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2010, 59(3): 235-249. DOI: 10.1016/j.jeem.2010.01.001.
- [31] 王建秀, 刘星茹, 尹宁. 社会公众监督与企业绿色环境绩效的关系研究 [J]. *经济问题*, 2020(8): 70-77. DOI: 10.16011/j.cnki.jjw.2020.08.009.
- [32] NAKANO T, TAYASU I, WADA E, et al. Sulfur and strontium isotope geochemistry of tributary rivers of Lake Biwa: Implications for human impact on the decadal change of lake water quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 345(1-3): 1-12. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.10.014.
- [33] 姜国俊, 肖云清. 水污染治理中企业社会责任的动力因素与培育机制 [J]. *湘潭大学学报 (哲学社会科学版)*, 2023, 47(2): 45-56. DOI: 10.13715/j.cnki.jxupss.2023.02.003.
- [34] 刘立刚, 廖倩凯, 刘焯斌, 等. 高标准农田建设项目三方演化博弈与仿真研究 [J]. *农林经济管理学报*, 2022, 21(3): 298-309. DOI: 10.16195/j.cnki.cn36-1328/f.2022.03.32.
- [35] 周亦宁, 刘继才. 考虑上级政府参与的 PPP 项目监管策略研究 [J]. *中国管理科学*, 2023, 31(2): 84-94. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0801.
- [36] SELTEN R. A note on evolutionarily stable strategies in asymmetric animal conflicts [M] // *Theory and Decision Library C*. Dordrecht: Springer Nether-

- lands, 1988: 67-75. DOI: [10.1007/978-94-015-7774-8_3](https://doi.org/10.1007/978-94-015-7774-8_3).
- [37] YANG Y, YANG W, CHEN H, et al. China's energy whistleblowing and energy supervision policy: An evolutionary game perspective[J]. *Energy*, 2020, 213: 118774. DOI: [10.1016/j.energy.2020.118774](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118774).
- [38] 李存芳, 仇然, 王语涵. 资源型企业绿色转型监察监管三方演化博弈及稳定性控制策略 [J]. *软科学*, 2022, 36(3): 99-109. DOI: [10.13956/j.ss.1001-8409.2022.03.14](https://doi.org/10.13956/j.ss.1001-8409.2022.03.14).

Evolutionary game on the compliant use of external water diversion and local water under government regulation and social supervision

YANG Gaosheng¹, JIANG Huan¹, TIAN Guiliang², MIAO Ganghui¹

(1. *Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China*; 2. *School of Economics and Finance, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: The local water price of the South-to-North Water Transfers Project was comparatively higher in some receiving areas. Driven by economic interests, the water users tended to illegally over-exploit the scarce local water resources, leading to a series of ecological and environmental problems in these regions. It is necessary to study the regulatory mechanisms of water use behavior under the dual constraints of government regulation and public supervision in order to reduce the illegal water use behavior in receiving areas.

The research took local governments, water users, and the public as three main participants. An evolutionary game model was established to explore the strategic choices of the participants under different scenarios. A system dynamics model was constructed for simulating the evolution of strategies in the three-party game system and the impact of key parameters on the behavior strategies of the participants.

The results showed that: (1) government regulation is affected by the cost of regulation, but only when the cost of strict regulation is controlled within a specific acceptable range could the government be more active in adopting the strategy of strict regulation. (2) Increasing government water fee subsidies and penalties could encourage users to choose external water. Water users were more sensitive to government subsidies than to penalties. (3) Supervision cost was a crucial factor influencing public participation in supervision and reporting. High supervision costs would lead the public to abandon participation in supervision and reporting.

It is concluded that the government played a guiding and constraining role in the water use behavior. It was necessary to establish reasonable and effective regulatory and punitive mechanisms to reduce illegal water use while providing appropriate water use subsidies to increase the willingness of water users to use external water. Additionally, as an essential supplement to the government's regulatory power, the public requires an incentive mechanism to enhance their participation in supervision and reporting. Relevant policy recommendations were proposed for reducing illegal water use behavior by improving government regulatory mechanisms and methods, perfecting effective punitive systems, and promoting public supervision.

Key words: government regulation; social monitoring; compliant water usage behavior; evolutionary game; system dynamics