

基于演化博弈的虚拟水战略政产学研合作模式研究*

支援，李蔡菊，梁龙跃

摘要：虚拟水战略是实体调水工程的有效补充，是调节区域水资源禀赋、保障水资源安全、创新水资源管理体制的重要手段之一。但在虚拟水战略落实过程中，围绕“政-产-研”合作如何调整各方关系、实现创新突破与切实落地，还有待研究。本研究围绕虚拟水产业发展中的政府、企业和研究机构互动关系，构建了虚拟水产业的政产学研多方演化博弈模型，探索各方的决策规律与改进出路。结果表明：政府、虚拟水企业及研究机构可以形成政产学研稳定合作的均衡，这与各方可调节因素的差异相关。由此，提出相应推动虚拟水战略落实的建议是：建立虚拟水产业阶梯式扶持机制；培育行业典型示范企业；优化合作模式，激发研究机构的创新活性。

关键词：虚拟水；政产学研合作；演化博弈；水资源

一、引言

水资源空间分布不均，是众多国家、地区所面临的问题^{[27][5]}。它放大了部分地区的水资源短缺问题，成为制约发展的一个关键。实施虚拟水战略，是平衡区域水资源禀赋、保障缺水地区用水需求的方式之一。“虚拟水”指生产有形产品或提供服务等无形产品过程中消耗的水资源；虚拟水战略是指借助产品的调度、贸易等手段，实现“虚拟水”从丰水国家/地区向缺水国家/地区的输送的一种策略，可以帮助缺水地区节约其本地的水资源，相当于增加了水资源的来源渠道，达到与实体调水工程相类似的“调水”效果。^{[12][18][14][31][15][1][20]}由于实施虚拟水战略的成本与实体调水工程、海水淡化、再生水回用等手段相比较低，且实体调水的能力存在极限，因此虚拟水战略被视为实体调水的重要补充手段，对水资源的合理配置、管理与可持续利用具有重要意义；对推进水利改革发展、加强资源节约集约利用和生态文明建设，具有重要价值。^{[22][29][30]}

虚拟水战略理论最早由 Allan^[13]做出阐释，Hoekstra 等众多学者进行了虚拟水调度的早期研究^{[19][17][16]}，均认为虚拟水概念丰富了水资源的涵义，是水资源和经济领域的交叉研究，有助于发挥市场作用，实现水资源配置与利用效率的长效优化；缺水地区/国家可以使用调配、贸易等手段，从水资源充裕的国家/地区获取虚拟水含量高（即生产过程耗水多）的产品，从而节约自身的水资源，既满足产品需求、又保证了水资源安全。虚拟水战略的实践也已经得到一定的实施，例如以色列等一些缺水国家率先实践了虚拟水战略，进口虚拟水含量高的产品，起到了减轻缺水压力的效果^{[28][8]}。

虽然目前国内外已经在虚拟水的理论方面进行了较多研究，但是在虚拟水战略的

* 作者简介：1.支援，贵州大学经济学院教授，硕士生导师，邮编：550025，邮箱：yzhi@gzu.edu.cn；2.李蔡菊（通讯作者），贵州大学经济学院硕士，邮箱：1825859851@qq.com；3.梁龙跃，贵州大学经济学院讲师，硕士生导师，邮箱：lianglongyue0830@sina.com。

基金项目：国家自然科学基金项目“基于水足迹的流域水资源完整压力及其产生机制研究”（52000045）；贵州省高校人文社会科学研究基地项目，马克思主义经济学与“双碳”目标的地方实践研究（23GZGXRWJD021）；贵州大学人文社会科学研究课题“碳生产率的时空演化格局及驱动因素研究”（GDYB2022048）。

具体落实方面、尤其是如何形成有效的虚拟水生产与输送产业联合体的问题上，还面临着瓶颈式的困局。目前虚拟水战略的实践范围还比较有限，多数国家与区域进行产品贸易时仍然以政策规划、经济效益为导向，而对虚拟水战略的大规模产业化应用的报道较少。例如，联合国“世界水资源评估计划”^[26]和 Seekell 等^[23]均认为，目前哈萨克斯坦等一些缺水国家迫于出口创汇的需求，反而向外输出虚拟水，过度开发利用其水资源，加剧了水资源耗竭的压力；而多数丰水国家并没有依照虚拟水战略，将其充裕的水资源禀赋充分利用，通过国际贸易向外输送虚拟水；这些与虚拟水战略相违背的做法，造成了水资源配置利用的低效率。Weiss 和 Slobodian^[24]调查发现，部分国家和地区在国际和地区贸易中，虽然将虚拟水输送往缺水地区，但其主观上并没有虚拟水战略的意识，这种带有巧合性质的虚拟水调度缺乏长久性、可持续性。总之，在实践中，虚拟水战略改善水资源分配的潜力还未充分发挥、落实，为了进一步切实解决全球水资源问题，不能只沿用现有的国际贸易运行与发展模式来调动虚拟水，而应当进一步研究其中的行为准则，调控虚拟水调度行为，才能真正落实虚拟水战略^{[27][5]}。

目前虚拟水战略的实施瓶颈主要来自“政-产-研”合作中的两方面因素。一方面是虚拟水相关企业自身的瓶颈：虚拟水调度中的节水生产技术等高附加值环节，由于存在一定技术难关、创新成本较高，形成企业难以创新突破的瓶颈；而虚拟水调度中的运输等低附加值环节，由于进入门槛低，部分企业重视成本而忽视技术，或采取传统的运输贸易模式而非符合虚拟水战略的模式^[9]，从而造成瓶颈。另一方面是“政-产-研”合作模式存在问题：部分区域政府注重短期政绩，鼓励企业开展技术和资金要求较低、收益回报快的项目，而教学科研机构也容易受其影响，较少深入探索虚拟水战略核心创新，而是围绕低端领域进行研究工作，且其研究成果转化不够顺畅。对于如何解决这一困境，落实与推进围绕虚拟水生产调度的虚拟水企业、政府、研究机构之间的“政-产-研”关系，现有的研究还较少^{[5][26][24][9]}。因此，如何推动政产学研有效合作，推动虚拟水相关产业高质量发展，切实贯彻落实虚拟水战略，以平衡区域水资源配置、改善水资源不可持续利用的状况，已成为水资源管理领域的重要战略问题。

虚拟水相关产业的发展不仅要受到用水技术、用水需求、产品市场等内部驱动因素影响，还受到虚拟水相关企业、政府、研究机构这些主体间的利益均衡和主体动机等因素的影响。虚拟水战略涉及的企业与各级政府、科研机构多方主体之间，通常为了追求各自利益的优化，进行着长期的互动博弈行为，并且政府、企业、科研机构这些群体性组织的理性程度具有一定的局限，存在失误、学习、改进的历程。在围绕虚拟水产业的“政-产-研”多方参与系统中，影响其合作的关键因素是什么？各类政策手段究竟对政产学研合作产生何种影响，具体表现为何种效应、其方向是正向或负向？应该采取怎样的路径，促进多方加强合作、突破发展瓶颈？各主体的某些利益变化，对多方关系又会产生哪些直接和间接影响？这些不断变化的问题，是虚拟水战略实施和相关产业发展中，围绕政府、企业、科研机构的博弈中值得研究的关键问题。而目前对于这类博弈问题，研究尚较少见诸报道^{[10][6]}。

因此，为探索虚拟水战略实施中围绕政产学研合作的上述规律与机制问题，有必要引入博弈论的原理和方法。博弈论是研究决策主体的行为及策略均衡的科学，随着该学科的发展，关于政产学研问题的博弈研究不断丰富，因此用博弈论的原理来分析上述虚拟水战略的瓶颈问题，有助于揭示虚拟水相关的经济社会系统中的规律与机制，完善在“科技-市场-管理”背景下的虚拟水战略理论，并且对推动虚拟水产业的发展、践行水资源的优化配置以及制定区域的长期可持续发展规划，都将起到支撑指导作用

[24,25]。为此，本研究构建博弈论中适用于此类问题的多方演化博弈模型，对虚拟水战略中的政产学研合作瓶颈及突破路径进行分析，并根据博弈模型分析结果，为虚拟水战略的实施提出相关建议。

二、 问题分析及方法建立

（一）问题分析

围绕虚拟水产业发展的政产学研博弈，属于一种动态、非合作、多参与方的博弈，主要的参与方为政府、虚拟水相关生产和调度企业、教育和研究机构。其中，政府通过奖励、补贴等方式，对相关企业实施虚拟水战略及产业创新行为提供正向的刺激；同时对研究机构给予科研经费支持和产学研合作奖励。企业通过虚拟水调度中的产品生产、运输和销售获得收益，同时进行核心技术创新，对政府带来区域经济、企业科技、生态指标提升等效益，对合作的教育研究机构提供研究经费和人才培养等收益。教育和研究机构在政产学研合作中为企业提供技术突破的科技帮助，为政府提供地方科技性项目成果、名誉收益、科技拉动投资等。同时，政府、企业和研究机构也都可能有时做出不明智的决策，对虚拟水战略“政-产-研”的合作倡议采取“不合作”的态度（即博弈策略），而使采取合作态度的其他各方“一头热”并受到损失，各方的策略又会对其他参与方未来的策略产生影响，且策略可能在此过程中经历多次调整、学习和改进，因此可将这种关系视为演化博弈。故而研究此博弈问题时，需要建立一个多方的演化博弈模型^[3]。

（二）模型建立

1.模型的基本假设

依照现有的相关理论^{[9][10][7][2]}，本研究建立了虚拟水产业发展的政产学研博弈模型，并对此模型进行了一些基本的简化假设，具体如下：

（1）将从事虚拟水产品生产活动和虚拟水产品运输、销售的企业合并，统称为虚拟水企业；将教育与研究机构合并为“研究机构”一个参与方。忽略各级政府、不同虚拟水企业、不同研究机构之间的差异。

（2）在此博弈模型中，设定博弈的三个参与方（政府、企业、研究机构）均为有限理性的，围绕虚拟水产业发展，三方均可以选择合作（即开展虚拟水产业创新相关工作）与不合作两种纯策略。

（3）政府、企业和研究机构在现实中可能会采取某些不正当手段，以提高收益，如投机、权力寻租、欺骗等。这是不利于维持博弈的正当性与可持续性的，因此在本研究中排除这部分不正当手段及其造成的收益。

2.模型的变量设置

本研究设定的虚拟水产业发展中的政府-企业-研究机构博弈的基本概念如下：

（1）政府选择合作策略（Y）的概率为 x ，选择不合作策略（N）的概率为 $(1-x)$ 。其各项可能的成本与收益分别为：上级政府为了支持引导地方政府推动虚拟水产业发展给予的投入或奖励（ G_1 ），如项目扶持、专项补贴等；虚拟水产业发展实现突破后对地方经济、资源、环境带来的区域效益（ G_2 ）；研究机构进行技术创新给政府带来

的声誉、项目成果、科技指标提升等收益 (G_3)；政府给予虚拟水企业的扶持和激励投入 (g_1)，以及对研究机构的类似投入 (g_2)；虚拟水企业和研究机构各自取得成功突破后，政府给其的奖励支出分别整合到 g_1 和 g_2 中。

(2) 虚拟水企业选择合作策略的概率为 y ，选择不合作策略的概率为 $(1 - y)$ 。其各项可能的成本与收益分别为：虚拟水企业无需进行创新突破、仅日常经营就可获得的固定收益 (α_1)，以及此选择下产生的机会损失 (γ)，如其他竞争企业创新突破获得的经济收益、社会评价收益等；虚拟水企业从地方政府处获得的扶持性和激励性财政补贴 (α_2)；企业在政产学研合作下通过创新突破获得的产业增值、社会评价提升等收益 (α_3)；企业进行创新突破的创新成本 (β_1)；当企业选择合作，而政府或研究机构有一方选择不合作时，虚拟水企业创新研发成功率降低，其收益 (α_4) 将会下降；而当政府和研究机构都选择不合作时，企业的创新研发将有较大可能 (概率 m) 失败，并遭受损失 (包括对创新投入的信心降低、对投资的打击等)，设企业研发失败产生的额外损失为 β_2 。与此同理，设政产学研三方合作时企业创新突破成功的概率为 p ；企业只和政府或研究机构之一合作的创新突破成功的概率为 s 。设产业增值、社会评价提升等收益的最大可能值为 α_0 ，创新开发力度为 q ，企业进行创新开发投入的最大可能值为 β_0 ，则有：

$$\alpha_3 = p\alpha_0, p \in (0, 1), p \propto q \tag{1}$$

$$\alpha_4 = s\alpha_0, s \in (0, p), s \propto q \tag{2}$$

$$\beta_1 = q\beta_0, q \in (0, 1) \tag{3}$$

(3) 研究机构选择合作策略的概率为 z ，选择不合作策略的概率为 $(1 - z)$ 。其各项可能的成本与收益分别为：研究机构在非合作下即可获得的基本收益 (A_1)；研究机构在产、学、研合作中获得的企业关联收益 (A_2)，包括横向研究经费和人才培养收益等；研究机构产、学、研合作中获得的政府支持 (A_3)，包括纵向课题经费、奖励等；虚拟水企业创新突破成功后研究机构的分享收益和社会评价收益等 (A_4)；研究机构进行技术突破所投入的创新成本 (B)。

3.模型的策略组合情况

根据各参与方的策略集合，可构建围绕虚拟水产业发展中的政产学研合作博弈模型树形图，如图 1 所示。

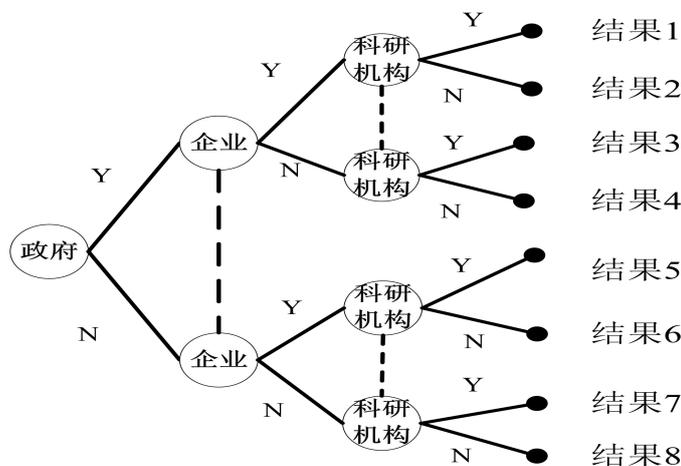


图 1 政产学研合作博弈树形图

博弈树形图对应的博弈结果及各方策略组合如表 1 所示。

表 1 政产学研合作三方博弈的策略组合

博弈结果编号	策略组合		
	政府	虚拟水企业	研究机构
1	合作	合作	合作
2	合作	合作	不合作
3	合作	不合作	合作
4	合作	不合作	不合作
5	不合作	合作	合作
6	不合作	合作	不合作
7	不合作	不合作	合作
8	不合作	不合作	不合作

通过模型参数和博弈策略组合，可得出各博弈结果下各参与方的收益，如表 2 所示。

表 2 政产学研合作三方博弈的收益

博弈结果编号	各方收益		
	政府	虚拟水企业	研究机构
1	$G1+pG2+G3-g1-g2$	$\alpha 1 + \alpha 2 + p \alpha 0 - \beta 1$	$A1+A2+A3+A4-B$
2	$G1+sG2-g1$	$\alpha 1 + \alpha 2 + s \alpha 0 - \beta 1$	$A1$
3	$G1+G3-g2$	$\alpha 1 - \gamma$	$A1+A3-B$
4	$G1$	$\alpha 1 - \gamma$	$A1$
5	$sG2+G3$	$\alpha 1 + s \alpha 0 - \beta 1$	$A1+A2+A4-B$
6	$(1-m) G2$	$\alpha 1 - \beta 1 - m \beta 2$	$A1$
7	$G3$	$\alpha 1 - \gamma$	$A1-B$
8	0	$\alpha 1 - \gamma$	$A1$

三、 博弈的均衡求解

在前文建立的三方博弈模型中，由于各方均为有限理性，当某一方的某种纯策略预期收益高于所有纯策略的平均预期收益时，将更有可能采取该纯策略，因此适用复制动态方程对该博弈模型进行求解^{[6][2]}。

(一) 复制动态方程建立

1. 政府的复制动态方程

用 U_{1Y} 表示政府选择合作 (Y) 策略时的预期收益, U_{1N} 表示政府选择不合作 (N) 策略时的预期收益, U_1 表示其平均预期收益, 则有

$$U_{1Y} = yz(G_1 + pG_2 + G_3 - g_1 - g_2) + y(1-z)(G_1 + sG_2 - g_1) + (1-y)z(G_1 + G_3 - g_2) + (1-y)(1-z)G_1 \quad (4)$$

$$U_{1N} = yz(sG_2 + G_3) + (1-y)zG_3 + y(1-z)(1-m)G_2 \quad (5)$$

$$U_1 = xU_{1Y} + (1-x)U_{1N} \quad (6)$$

政府的复制动态方程 $F_1(x)$ 为:

$$F_1(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{1Y} - U_1) = x(1-x)[yzG_2(p - 2s + 1 - m) - zg_2 + G_1 + y(sG_2 - (1-m)G_2 - g_1)] \quad (7)$$

2. 虚拟水企业的复制动态方程

用 U_{2Y} 表示虚拟水企业选择 Y 策略时的预期收益, U_{2N} 表示虚拟水企业选择 N 策略时的预期收益, U_2 表示其平均预期收益, 则有

$$U_{2Y} = xz(\alpha_1 + \alpha_2 + p\alpha_0 - \beta_1) + x(1-z)(\alpha_1 + \alpha_2 + s\alpha_0 - \beta_1) + (1-x)z(\alpha_1 + s\alpha_0 - \beta_1) + (1-x)(1-z)(\alpha_1 - \beta_1 - m\beta_2) \quad (8)$$

$$U_{2N} = xz(\alpha_1 - \gamma) + x(1-z)(\alpha_1 - \gamma) + (1-x)z(\alpha_1 - \gamma) + (1-x)(1-z)(\alpha_1 - \gamma) \quad (9)$$

$$U_2 = yU_{2Y} + (1-y)U_{2N} \quad (10)$$

虚拟水企业的复制动态方程 $F_2(y)$ 为:

$$F_2(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{2Y} - U_2) = y(1-y)[xz(p\alpha_0 - 2s\alpha_0 - m\beta_2) + x(s\alpha_0 + \alpha_2 + m\beta_2) + z(s\alpha_0 + m\beta_2) - \beta_1 - m\beta_2 + \gamma] \quad (11)$$

3. 研究机构的复制动态方程

用 U_{3Y} 表示研究机构选择 Y 策略时的预期收益, U_{3N} 表示研究机构选择 N 策略时的预期收益, U_3 表示其平均预期收益, 则有

$$U_{3Y} = xy(A_1 + A_2 + A_3 + pA_4 - B) + x(1-y)(A_1 + A_3 - B) + (1-x)y(A_1 + A_2 + sA_4 - B) + (1-x)(1-y)(A_1 - B) \quad (12)$$

$$U_{3N} = xyA_1 + x(1-y)A_1 + (1-x)yA_1 + (1-x)(1-y)A_1 \quad (13)$$

$$U_3 = zU_{3Y} + (1-z)U_{3N} \quad (14)$$

研究机构的复制动态方程 $F_3(z)$ 为:

$$F_3(z) = \frac{dz}{dt} = z(U_{3Y} - U_3) = z(1-z)[xyA_4(p - s) + xA_3 + y(A_2 + sA_4) - B] \quad (15)$$

(二) 均衡点及其稳定性

1. 均衡点分析

(1) 对复制动态方程(7)进行均衡点分析可得:

①若 $yzG_2(p - 2s + 1 - m) + y(sG_2 - (1 - m)G_2 - g_1) - zg_2 + G_1 = 0$, $F_1(x) =$

0, 而 $\frac{dF_1(x)}{dx} = 0$, 所有 x 取值均为非稳定状态, 均衡点处于临界状态, 即此时政府采取任何策略都没有演化均衡策略;

②若 $yzG_2(p - 2s + 1 - m) + y(sG_2 - (1 - m)G_2 - g_1) - zg_2 + G_1 > 0$, $x = 0$ 和 $x = 1$ 为稳定状态。由于 $x = 0$ 时, $\frac{dF_1(x)}{dx} > 0$; $x = 1$ 时, $\frac{dF_1(x)}{dx} < 0$, 故 $x = 1$ 是均衡点, 即此时政府选择 Y 策略、鼓励促进虚拟水产业政产学研创新突破是演化均衡策略;

③若 $yzG_2(p - 2s + 1 - m) + y(sG_2 - (1 - m)G_2 - g_1) - zg_2 + G_1 < 0$, $x = 0$ 和 $x = 1$ 为稳定状态。由于 $x = 0$ 时, $\frac{dF_1(x)}{dx} < 0$; $x = 1$ 时, $\frac{dF_1(x)}{dx} > 0$, 故 $x = 0$ 是均衡点, 即此时政府选择 N 策略、不参与虚拟水产业创新突破是演化均衡策略。

(2) 对复制动态方程(11)进行均衡点分析可得:

④若 $xz(p\alpha_0 - 2s\alpha_0 - m\beta_2) + x(s\alpha_0 + \alpha_2 + m\beta_2) + z(s\alpha_0 + m\beta_2) - \beta_1 - m\beta_2 + \gamma = 0$, $F_2(y) = 0$, 但 $\frac{dF_2(y)}{dy} = 0$, 所有 y 取值均为非稳定状态, 均衡点处于临界状态, 即此时虚拟水企业采取任何策略都没有演化均衡策略;

⑤若 $xz(p\alpha_0 - 2s\alpha_0 - m\beta_2) + x(s\alpha_0 + \alpha_2 + m\beta_2) + z(s\alpha_0 + m\beta_2) - \beta_1 - m\beta_2 + \gamma > 0$, $y = 0$ 和 $y = 1$ 为稳定状态。由于 $y = 0$ 时, $\frac{dF_2(y)}{dy} > 0$; $y = 1$ 时, $\frac{dF_2(y)}{dy} < 0$, 故 $y = 1$ 是均衡点, 即此时虚拟水企业选择 Y 策略、进行创新突破是演化均衡策略;

⑥若 $xz(p\alpha_0 - 2s\alpha_0 - m\beta_2) + x(s\alpha_0 + \alpha_2 + m\beta_2) + z(s\alpha_0 + m\beta_2) - \beta_1 - m\beta_2 + \gamma < 0$, $y = 0$ 和 $y = 1$ 为稳定状态。由于 $y = 0$ 时, $\frac{dF_2(y)}{dy} < 0$; $y = 1$ 时, $\frac{dF_2(y)}{dy} > 0$, 故 $y = 0$ 是均衡点, 即此时虚拟水企业选择 N 策略、维持现状是演化均衡策略。

(3) 对复制动态方程(15)进行均衡点分析可得:

⑦若 $xyA_4(p - s) + xA_3 + y(A_2 + sA_4) - B = 0$, $F_3(z) = 0$, 而 $\frac{dF_3(z)}{dz} = 0$, 所有 z 取值均为非稳定状态, 均衡点处于临界状态, 即此时研究机构采取任何策略都没有演化均衡策略;

⑧若 $xyA_4(p - s) + xA_3 + y(A_2 + sA_4) - B > 0$, $z = 0$ 和 $z = 1$ 为稳定状态, 由于 $z = 0$ 时, $\frac{dF_3(z)}{dz} > 0$; $z = 1$ 时, $\frac{dF_3(z)}{dz} < 0$, 故 $z = 1$ 是均衡点, 即此时研究机构选择 Y 策略、参与虚拟水政产学研合作是演化均衡策略;

⑨若 $xyA_4(p - s) + xA_3 + y(A_2 + sA_4) - B < 0$, $z = 0$ 和 $z = 1$ 为稳定状态, 由于 $z = 0$ 时, $\frac{dF_3(z)}{dz} < 0$; $z = 1$ 时, $\frac{dF_3(z)}{dz} > 0$, 故 $z = 0$ 是均衡点, 即此时研究机构选择 N 策略、不参与政产学研合作是演化均衡策略。

根据上述均衡点分析, 设 $t_0 = pA_4 - sA_4$, $t_1 = A_2 + sA_4$, $t_2 = (p - 2s + 1 - m)G_2$, $t_3 = sG_2 - (1 - m)G_2 - g_1$, $t_4 = p\alpha_0 - 2s\alpha_0 - m\beta_2$, $t_5 = s\alpha_0 + \alpha_2 + m\beta_2$, $t_6 = s\alpha_0 + m\beta_2$, $t_7 = \beta_1 + m\beta_2 - \gamma$, 可联立方程组:

$$\begin{cases} yzt_2 + yt_3 - zg_2 + G_1 = 0 \\ xzt_4 + xt_5 + zt_6 - t_7 = 0 \\ xyt_0 + xA_3 + yt_1 - B = 0 \end{cases} \quad (16)$$

求解方程组(16), 设 $t_8 = Bt_4 + A_3t_6$, $t_9 = t_0t_6 - t_1t_4$, $t_{10} = t_1t_5 + t_0t_7$, $t_{11} = A_3t_7 - Bt_5$, $t_{12} = g_2t_9 - t_2t_8$, $t_{13} = t_2t_{11} - t_3t_8 + g_2t_{10} + G_1t_9$, $t_{14} = t_3t_{11} - G_1t_{10}$ 可得:

$$\begin{cases} x = \frac{t_7 - zt_6}{zt_4 + t_5} \\ y = \frac{zg_2 - G_1}{zt_2 + t_3} \\ z = \frac{\sqrt{t_{13}^2 - 4t_{12}t_{14} - t_{13}}}{2t_{12}} \end{cases} \quad (17)$$

令此解中的 x, y, z 值分别为 x^*, y^*, z^* , 则博弈的又一均衡解为 (x^*, y^*, z^*) 。综上, 当 x, y, z 取不同值时, 该博弈系统的各个均衡点如表 3 所示。

表 3 政产学研合作三方博弈的演化均衡

情况编号	x 取值	y 取值	z 取值	均衡解
1	$x = x^*$	$y = y^*$	$z = z^*$	(x^*, y^*, z^*)
2	$x > x^*$	$y > y^*$	$z > z^*$	$(1, 1, 1)$
3	$x > x^*$	$y > y^*$	$z < z^*$	$(1, 1, 0)$
4	$x > x^*$	$y < y^*$	$z > z^*$	$(1, 0, 1)$
5	$x > x^*$	$y < y^*$	$z < z^*$	$(1, 0, 0)$
6	$x < x^*$	$y > y^*$	$z > z^*$	$(0, 1, 1)$
7	$x < x^*$	$y > y^*$	$z < z^*$	$(0, 1, 0)$
8	$x < x^*$	$y < y^*$	$z > z^*$	$(0, 0, 1)$
9	$x < x^*$	$y < y^*$	$z < z^*$	$(0, 0, 0)$

2. 均衡点稳定性分析

在求出博弈均衡点的基础上, 可以通过分析雅可比矩阵 \mathbf{J} 的局部稳定性, 分析博弈系统在这些均衡点的局部稳定性^[4]。具体来说, 有

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} (1-2x)(yzt_2 + yt_3 - zg_2 + G_1) & (x-x^2)(zt_2 + t_3) & (x-x^2)(yt_2 - g_2) \\ (y-y^2)(zt_4 + t_5) & (1-2y)(xzt_4 + xt_5 + zt_6 - t_7) & (y-y^2)(xt_4 + t_5) \\ (z-z^2)(yt_0 + A_3) & (z-z^2)(xt_0 + t_1) & (1-2z)(xyt_0 + xA_3 + yt_1 - B) \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据李雅普诺夫第一法(The first method of Lyapunov), 通过比较在不同影响因素作用下矩阵特征值的实部符号, 可以分析各个均衡点策略的稳定性^{错误!未找到引用源。}, 见表 4。

表 4 博弈均衡点的稳定性分析

均衡点	特征值符号	稳定性	条件
$E_1=(1, 1, 1)$	$-, -, -$	演化稳定	①
$E_2=(1, 1, 0)$	$-, -, -$	演化稳定	②
$E_3=(1, 0, 1)$	$-, -, -$	演化稳定	③
$E_4=(1, 0, 0)$	$-, -, -$	演化稳定	④
$E_5=(0, 1, 1)$	$-, -, -$	演化稳定	⑤
$E_6=(0, 1, 0)$	$-, -, -$	演化稳定	⑥
$E_7=(0, 0, 1)$	$+, \times, \times$	鞍点	\
$E_8=(0, 0, 0)$	$+, \times, \times$	鞍点	\
$E_9=(x^*, y^*, z^*)$	\	鞍点	\

注：×表示正负符号不确定，\表示这种情况下不符合考虑范畴，因为任意数值均不可能使该点成为演化稳定点，若均衡点对应的条件不满足，该均衡点不稳定或无意义。

由表 4 可知，均衡点不一定是演化稳定策略，还要判断其是否处于局部稳定状态。在不同的条件下，三方的演化稳定策略会形成以下六种情况中的某一种。具体形成这六个稳定均衡中的哪一个，与 x 、 y 、 z 的初始状态有关，也与满足的条件有关。

在满足条件①： $(p-s)G_2 - g_1 - g_2 + G_1 > 0$ ， $p\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma > 0$ ， $A_2 + A_3 + PA_4 - B > 0$ 时，均衡点 $E(1,1,1)$ 为系统的演化稳定点(ESS)，此时政府选择支持虚拟水战略创新发展，虚拟水企业选择大力投入创新，研究机构选择研发虚拟水创新思路、方法与技术，三方各自的收益均大于自身选择相反策略时的收益，具备形成政产学研合作稳定状态的可能性。

在满足条件②： $(s+m-1)G_2 - g_1 + G_1 > 0$ ， $s\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma > 0$ ， $A_2 + A_3 + PA_4 - B < 0$ 时，均衡点 $E(1,1,0)$ 为系统的演化稳定点，此时政府选择支持虚拟水战略创新发展，虚拟水企业选择大力投入创新，但研究机构选择不研发虚拟水创新思路、方法与技术。

在满足条件③： $G_1 - g_2 > 0$ ， $p\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma < 0$ ， $A_3 - B > 0$ 时，均衡点 $E(1,0,1)$ 为系统的演化稳定点，此时政府选择支持虚拟水战略创新发展，企业对虚拟水产业创新的积极性不高，研究机构选择研发虚拟水创新思路、方法与技术。

在满足条件④： $G_1 > 0$ ， $s\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma < 0$ ， $A_3 - B < 0$ 时，均衡点 $E(1,0,0)$ 为系统的演化稳定点，此时政府选择支持虚拟水战略创新发展，虚拟水企业选择不投入创新，且研究机构也不能稳定坚持对其进行研究。

在满足条件⑤： $(p-s)G_2 - g_1 - g_2 + G_1 < 0$ ， $s\alpha_0 - \beta_1 + \gamma > 0$ ， $A_2 + sA_4 - B > 0$ 时，均衡点 $E(0,1,1)$ 为系统的演化稳定点，此时政府选择不支持虚拟水战略创新发展，虚拟水企业选择大力投入创新，研究机构选择研发虚拟水创新思路、方法与技术。

在满足条件⑥： $(s+m-1)G_2 - g_1 + G_1 < 0$ ， $\beta_1 + m\beta_2 - \gamma < 0$ ， $A_2 + sA_4 - B < 0$ 时，均衡点 $E(0,1,0)$ 为系统的演化稳定点，此时政府选择不支持虚拟水战略创新发展，虚拟水企业选择大力投入创新，研究机构选择不研发虚拟水创新思路、方法与技

术。

若均衡点 $E(0,0,1)$ 成为系统的演化稳定点，需满足条件： $G_1 - g_2 < 0$ ， $s\alpha_0 - \beta_1 + \gamma < 0$ ， $B < 0$ ，其中 $B < 0$ 有悖于本文对参数 B 的设定范围，故不可能得到 $E(0,0,1)$ 这一演化稳定情况。同理，均衡点 $E(0,0,0)$ 若要成为系统的演化稳定点，需满足条件： $G_1 < 0$ ， $\gamma - \beta_1 - \beta_2 < 0$ ， $B > 0$ ，其中 $G_1 < 0$ 显然不符合本文对参数 G_1 的设定范围，故也不可能得到 $E(0,0,0)$ 这一演化稳定情况。均衡点 $E(x^*, y^*, z^*)$ 的特征值全为 0，不符合特征值符号全为负，故也不能得到 $E(x^*, y^*, z^*)$ 的演化稳定情况。

四、数值模拟及分析

本研究对求得的均衡解 $E(1,1,1)$ 和 $E(1,0,0)$ 进行数值模拟，并进一步讨论各相关变量及初始合作意愿对三方合作的实际影响。由式(7)、式(11)、式(15)可以看出，可能影响政府、虚拟水企业和研究机构三方选择“合作”策略的重要因素包括：政府选择合作策略的概率 x 、上级政府对地方政府的投入 G_1 、虚拟水产业发展实现突破后对经济-资源-环境的区域效益 G_2 、对企业和研究机构的创新激励 g_1 和 g_2 、虚拟水产业创新突破的成功率 p 和 s 、虚拟水企业选择合作策略的概率 y 、产业增值、社会评价提升等收益的最大可能值 α_0 、企业获得的政府扶持和激励 α_2 、企业进行创新突破的创新成本 β_1 、企业的创新研发失败率 m 、企业创新失败的额外损失 β_2 、机会成本 γ 、研究机构选择合作策略的概率 z 、企业的关联收益 A_2 、政府对研究机构的激励 A_3 、虚拟水企业创新突破成功的分享收益 A_4 、研究机构自身的创新投入成本 B 。其中， p 、 s 、 q 、 m 的取值范围为 $[0,1]$ ，其余变量均为非负数。

由此，为验证演化稳定性分析的有效性，本研究将三方不完全理性下的动态博弈可视化，并根据等式平衡原则设定各参数满足数组 I： $G_1=3$ ， $G_2=0.5$ ， $g_1=2$ ， $g_2=1$ ， $p=0.6$ ， $s=0.4$ ， $\alpha_0=3$ ， $\alpha_2=1$ ， $\beta_1=2$ ， $\beta_2=1$ ， $m=0.6$ ， $\gamma=3$ ， $A_2=2$ ， $A_3=3$ ， $A_4=2$ ， $B=3$ ，该数组参数满足条件①： $(p-s)G_2 - g_1 - g_2 + G_1 > 0$ ， $p\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma > 0$ ， $A_2 + A_3 + PA_4 - B > 0$ 时，均衡点 $E(1,1,1)$ 为系统的演化稳定点。根据以上参数假定利用 Matlab 2021a 进行数值仿真。在数组 I 假定的基础上，分别模拟分析 G_1 、 g_1 、 g_2 、 α_2 、 β_1 、 β_2 、 m 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 B 等因素对政府、虚拟水企业、研究机构三方合作演化博弈过程和结果的影响，并最终验证策略组合的稳定性。

(一) 不同因素对演化稳定均衡的影响

在满足 $(p-s)G_2 - g_1 - g_2 + G_1 > 0$ ， $p\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma > 0$ ， $A_2 + A_3 + PA_4 - B > 0$ 条件时，分析 G_1 、 g_1 、 g_2 、 α_2 、 β_1 、 β_2 、 m 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 B 对三方合作演化博弈过程的影响。

分析政府可调节的因素中，上级政府对地方政府的投入 G_1 、政府对企业和研究机构的创新激励 g_1 和 g_2 变化对三方合作演化博弈过程的影响。为分析 G_1 、 g_1 和 g_2 变化对演化博弈过程的影响， G_1 分别取 3、2、1， g_1 分别取 1、2、3， g_2 分别取 1、2、3，复制动态方程随时间演化 50 次的仿真结果分别如图 2-4 所示。

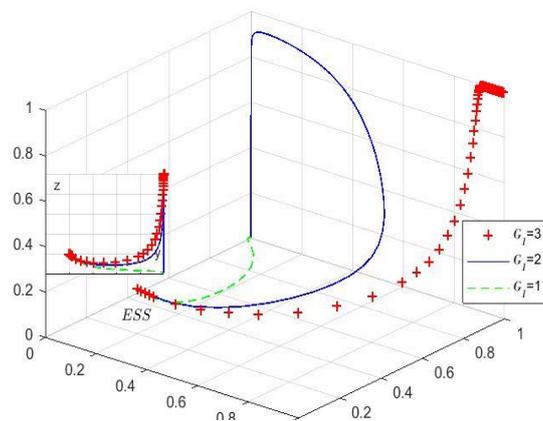


图 2 G_1 对演化博弈过程的影响

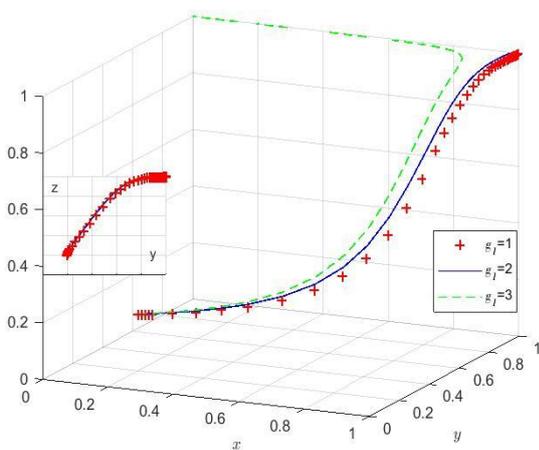


图 3 g_1 对演化博弈过程的影响

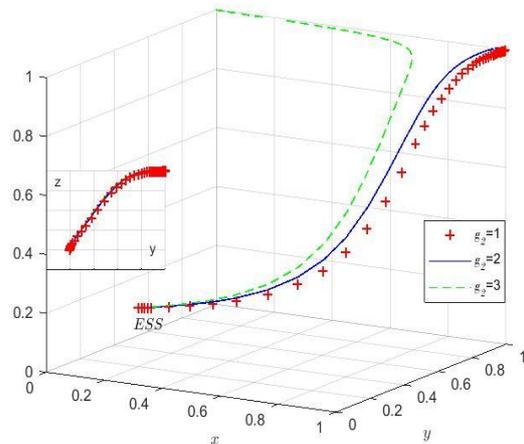


图 4 g_2 对演化博弈过程的影响

由图 2 可知，在系统演化过程中，上级政府对地方政府的投入减少显著降低了政府支持虚拟水战略发展的合作概率，也明显使研究机构失去研发虚拟水创新思路、方法与技术的信心，从而使其合作意愿由合作转变为不合作，虚拟水企业的参与积极性也有所减弱。可见，地方政府在发展虚拟水产业时，获得的上級扶持 G_1 是其重点考虑的收益之一，但此项收益可能会以补贴、奖励等方式传递至企业和研究机构，并且地方政府在政产学研合作创新突破后，还要额外支付给企业与研究机构奖励，这也会影响政府的策略选择。

由图 3 和图 4 可知，在系统演化至稳定点的过程中，随着政府对企业和研究机构的创新激励 g_1 和 g_2 提高，政府支持虚拟水战略发展的合作概率先逐步降低，再呈现出跳水式降低为 0，而虚拟水企业和研究机构均保持合作的策略，表明政府的扶持性补贴 (g_1 和 g_2) 对双方选择合作策略具有促进作用。从数值上来看，演化均衡点由 $E(1,1,1)$ 变为了 $E(0,1,1)$ 。如果地方政府认为对虚拟水产业发展突破的成功几率不高、收益过小、或需要政府先行支付的补贴/激励过多，都可能引起地方政府的悲观和疑虑，影响政府选择合作的可能性。

分析虚拟水企业可调节的因素中，虚拟水企业获得的政府扶持和激励 α_2 、企业进行创新突破的创新成本 β_1 、企业创新失败后的额外损失 β_2 变化对三方合作演化博弈过程的影响。为分析 α_2 、 β_1 、 β_2 、 m 变化对演化博弈过程的影响， α_2 分别取 1、2、3， β_1 分别取 2、3、4， β_2 分别取 1、2、3， m 分别取 0.6、0.4、0.8，复制动态方程随时

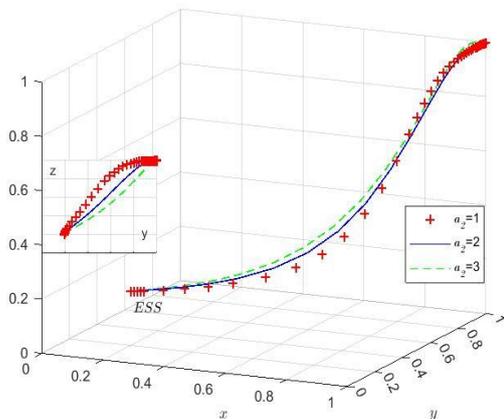


图 5 α_2 对演化博弈过程的影响

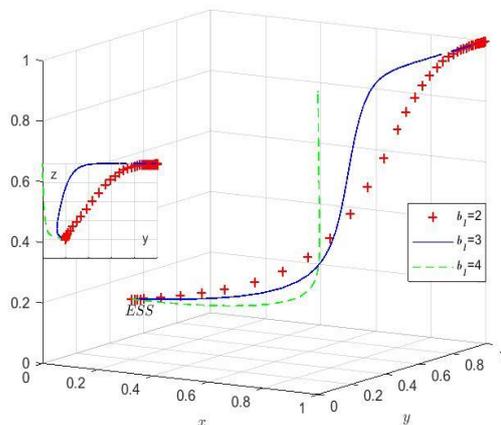


图 6 β_1 对演化博弈过程的影响

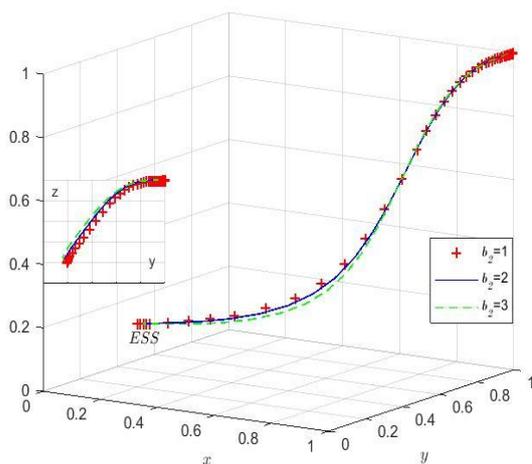


图 7 β_2 对演化博弈过程的影响

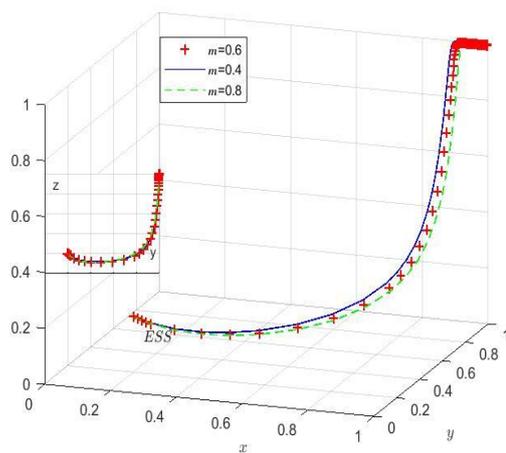


图 8 m 对演化博弈过程的影响

间演化 50 次的仿真结果分别如图 5–8 所示。

由图 5 可知，在系统演化至稳定点的过程中，随着虚拟水企业获得的政府扶持和激励 α_2 提高，虽然最终均衡结果均演化为 $E(1,1,1)$ ，但是在这一过程中，虚拟水企业加快进行虚拟水创新发展的演化速度，而研究机构进行研发的演化速度相对减缓。因此，虚拟水企业想要加快达成三方合作意向，可以向政府申请增加对虚拟水建设的扶持和激励金，助力虚拟水企业的创新发展。

由图 6 可知，在系统演化至稳定点的过程中，随着虚拟水企业进行创新突破的创新成本 β_1 增加，虚拟水企业进行产品创新投入的演化速度逐渐减慢随后骤降至 0，而政府支持虚拟水发展和研究机构继续产品研发的意愿却明显提升，演化均衡点由 $E(1,1,1)$ 变为了 $E(1,0,1)$ 。这表明：为实现三方合作的稳定均衡，若政府能够帮助企业减小创新的成本，能够促进企业选择合作策略。

由图 7 可知，在系统演化至稳定点的过程中，随着企业创新失败后的额外损失 β_2 增加，虚拟水企业进行产品创新投入的演化速度减慢，政府支持虚拟水发展和研究机构继续产品研发的演化速度加快，最终稳定均衡点仍为 $E(1,1,1)$ 。因此，虚拟水企业若能适当调整其创新失败后导致的额外损失，将其数值降低在企业能处于合作创新的状态，可以提高政府和研究机构的合作意愿。

由图 8 可知，在系统演化至稳定点的过程中，企业的创新研发失败率 m 的增加减缓了虚拟水企业进行创新投入的演化速度，达到均衡点 $E(1,1,1)$ 的时间变长。其中，创新成功率 $(1-m)$ 对企业策略产生的影响，也取决于政府和研究机构参与合作的几率 x 和 z ，因为对于企业而言，地方政府对于产业发展有重要的导向作用，而研究机构作为研发的重要主体，在产业技术突破中也具有重要的地位。

分析虚拟水研究机构可调节的因素中，企业的关联收益 A_2 、政府对研究机构的激励 A_3 、虚拟水企业创新突破成功的分享收益 A_4 、研究机构自身的创新投入成本 B 变化对三方合作演化博弈过程的影响。为分析 A_2 、 A_3 、 A_4 、 B 变化对演化博弈过程的影响， A_2 分别取 3、2、1， A_3 分别取 1、2、3， A_4 分别取 2、3、4， B 分别取 0.5、1、2，复制动态方程随时间演化 50 次的仿真结果如图 9-12 所示。

由图 9 可知，在系统演化至稳定点的过程中，企业的关联收益 A_2 的降低减缓了研究机构进行创新研发的演化速度，虚拟水企业进行创新投入的概率上升，最终均衡点仍为 $E(1,1,1)$ 。因此，为了实现稳定的三方合作均衡，在确保政府和虚拟水企业参与

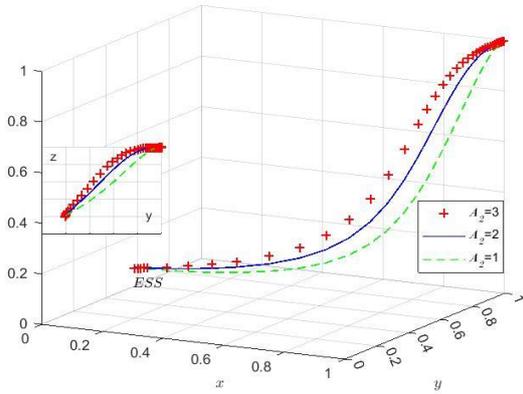


图 9 A_2 对演化博弈过程的影响

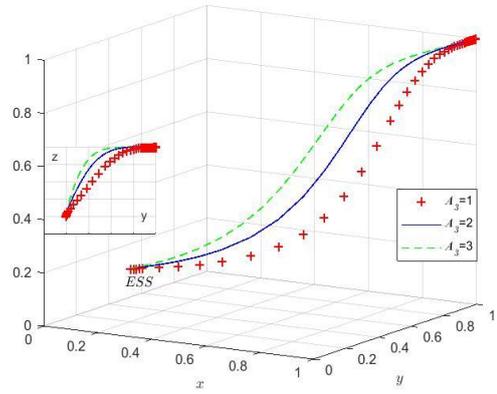


图 10 A_3 对演化博弈过程的影响

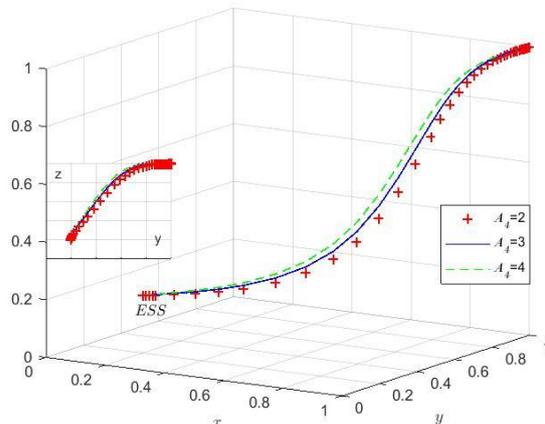


图 11 A_4 对演化博弈过程的影响

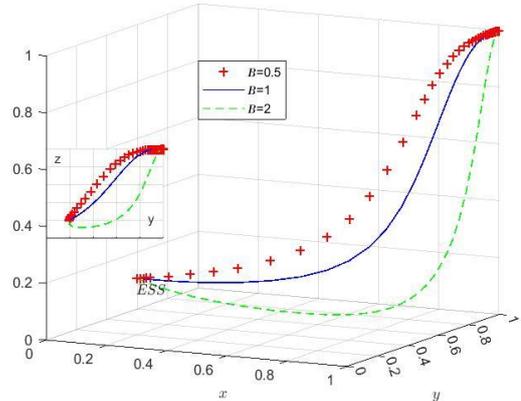


图 12 B 对演化博弈过程的影响

合作的基础上,研究机构可以通过提高企业的关联收益来加快其创新研发的演化速度。

由图 10 可知,在系统演化至稳定点的过程中,随着政府对研究机构的激励逐渐提高,研究机构进行创新研发的演化速度明显加快,但政府和虚拟水企业参与合作的演化速度放缓。因此,为了实现稳定的三方合作均衡,在确保政府和虚拟水企业参与合作的基础上,研究机构可以通过申请提高对研究机构的激励来加快其创新研发的演化速度。

由图 11 可知,虚拟水企业创新突破成功的分享收益 A_4 增加对政府、虚拟水企业及研究机构各自的合作概率没有显著改善,在系统演化至稳定点的过程中,最终均稳定于均衡点 $E(1,1,1)$ 。因此,虚拟水企业创新突破成功的分享收益对三方合作的影响程度较小。

由图 12 可知,在系统演化至稳定点的过程中,研究机构自身的创新投入成本 B 增加,研究机构进行创新研发的演化速度显著变慢,而政府支持虚拟水战略发展和虚拟水企业参与创新投入的演化速度变快,最后达到演化的稳定均衡点 $E(1,1,1)$ 。在现实中,虚拟水相关研究机构进行研发及科技创新突破,所需的成本相对企业和政府而言较低,而收益是多方面的;即便创新突破失败,研究机构遭遇的损失也较低。当创新活动失败时,企业将受到最大的损失,政府也将受到一定影响,而研究机构的风险成本相对较小,可能导致其参与力度和成果转化的动力不足。若研究机构在整个政产学研合作中投入的成本增大,则对其是一个有效约束和激励。因此,有必要针对研究机构探讨建立合理的创新激励机制和退出机制。

从整体上看,要想实现三方合作的演化稳定,政府、虚拟水企业、研究机构均可以综合调节各自可调控的因素来推进合作达成。例如:研究机构提高自身创新投入成本时,牺牲了自己的部分收益来加快政府和虚拟水企业实现三方合作,政府可以同时通过对研究机构的激励来弥补研究机构的损失部分,虚拟水企业也同时提高其创新突破的创新成本,各方同时的调节可以更高效地加快三方达成合作的演化速度。现实中,若政府一味依靠补贴推动企业参与产、学、研合作,虽然短期内能够起到一定的促进推动作用,但政府如果支付过多的补贴,不但会造成其成本过高的问题,还可能使虚拟水企业仅关注补贴、而对落实真正的创新突破行为缺乏动力。政府应当在适度补贴的基础上,在企业人才支撑、知识产权保护、提供政务服务、市场引导等方面提供帮助,同时构建虚拟水产业突破后的奖励机制和帮助虚拟水产品输送、交易的市场引导机制,多方位降低企业的创新成本和风险。

(二) 稳定策略组合的验证

在满足 $(p-s)G_2 - g_1 - g_2 + G_1 > 0$, $p\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma > 0$, $A_2 + A_3 + PA_4 - B > 0$ 条件时,分析不同初始策略组合的演化图,检验不同初始策略组合经过多次演化后最终是否稳定于均衡点 $E(1,1,1)$,即政府大力支持虚拟水战略创新发展,虚拟水企业积极投入创新,研究机构不断研发虚拟水创新思路、方法与技术。在满足上述条件时,从不同初始策略随时间演化 100 次,如图 13 所示。

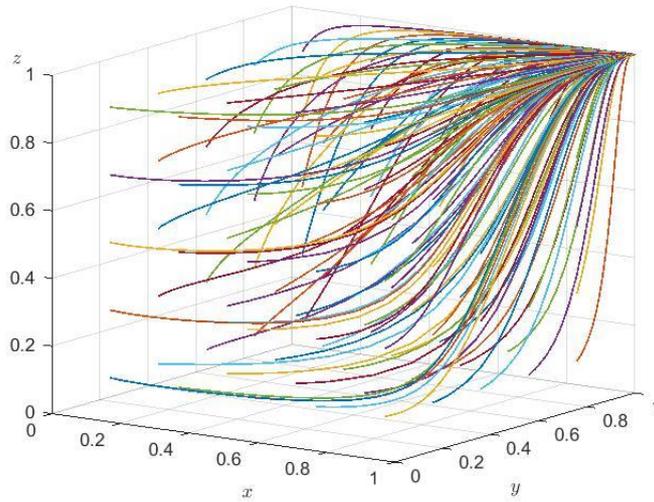


图 5 不同初始策略的演化 100 次的结果

这一仿真结果表明，在满足条件①： $(p-s)G_2 - g_1 - g_2 + G_1 > 0$ ， $p\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma > 0$ ， $A_2 + A_3 + PA_4 - B > 0$ 的情况下，系统仅存在一个演化稳定点 $E(1,1,1)$ ，即政府支持虚拟水战略发展，虚拟水企业积极投入创新，研究机构积极研发虚拟水创新思路、方法与技术的策略组合是唯一演化稳定策略组合。故而，政府应该大力支持虚拟水战略创新发展，包括增加对地方政府的投入和对虚拟水企业和研究机构的创新激励，虚拟水企业应该积极投入创新，提供更多创新性产品，研究机构不断研发虚拟水创新思路、方法与技术，为虚拟水企业和政府在虚拟水战略的发展中提供更多的新成果。可见，仿真分析与各方策略稳定性分析结论一致且具有有效性，对虚拟水战略政产学研合作具有现实指导意义。

（三）三方初始合作意愿对演化均衡的影响

假定另一数组 II 各参数满足： $G_1=1$ ， $G_2=4$ ， $g_1=2$ ， $g_2=0.5$ ， $p=0.8$ ， $s=0.3$ ， $\alpha_0=2$ ， $\alpha_2=1.5$ ， $\beta_1=4.2$ ， $\beta_2=0.2$ ， $\gamma=2$ ， $A_2=2$ ， $A_3=1$ ， $A_4=2$ ， $B=3$ ，此时的数组满足条件④： $G_1 > 0$ ， $s\alpha_0 + \alpha_2 - \beta_1 + \gamma < 0$ ， $A_3 - B < 0$ ，均衡点 $E(1,0,0)$ 为系统的演化稳定点。

根据以上假定研究三方初始合作意愿同时改变对演化均衡结果的影响，如图 14 所示。假定三方初始合作意愿相等，即 $x=y=z$ 。当三方达成虚拟水战略合作的意愿均处于较低水平时， x 收敛于 1， y 、 z 收敛于 0，最终均衡点趋向于 $E(1,0,0)$ ，即政府选择支持虚拟水战略创新发展，而虚拟水企业选择不投入创新，且研究机构也不能稳定坚持对其进行研究。当三方合作意愿处于中等水平时， x 收敛于 1， y 、 z 收敛于 0，最终均衡点仍趋向于 $E(1,0,0)$ ，但是演化过程中可以看出：政府的合作意愿明显加快，比第一种情况用更短的演化时间达到 1 的合作意愿水平，同时虚拟水企业和研究机构的合作意愿也更缓慢地减少至不合作的水平。当三方的初始合作意愿都较高时，虚拟水企业和研究机构的合作意愿发生了质的变化， x 、 y 、 z 均收敛于 1，最终均衡点趋向于 $E(1,1,1)$ 。

同时，分析不同初始策略组合在这一数组假定下的演化图，检验不同初始策略组合经过 100 次演化后的结果如图 15 所示。可以看出不同初始策略组合在演化 100 次

后出现两个均衡点 $E(1,0,0)$ 和 $E(1,1,1)$ ，这表明不同初始策略组合对演化的最终结果有

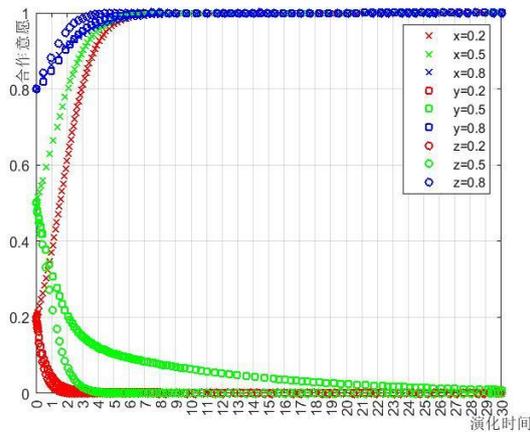


图 14 初始合作意愿 x, y, z 同时变化的演化结果

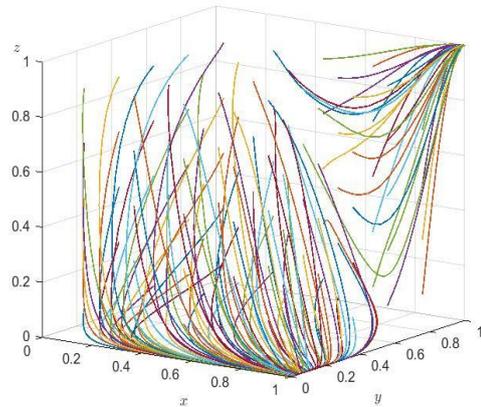


图 15 不同初始策略的演化 100 次的结果

不同影响，可以通过调整三方不同初始合作意愿使虚拟水战略政产学研合作达成。

结合图 14-15 的仿真结果表明，即使初始条件下的均衡点是 $E(1,0,0)$ ，不满足均衡最终稳定演化为 $E(1,1,1)$ ，但当三方初始合作意愿较高时，也有实现演化最终收敛于稳定均衡点 $E(1,1,1)$ 的可能，且随着三方初始意愿的增加， x, y, z 收敛于 1 的速度越快。当虚拟水企业和研究机构的合作意愿都很强烈时，即使政府合作意愿较低，企业也会选择进行技术创新，此时政府的参与力度可以放缓，这种情况下也能得到三方实现政产学研合作的稳定均衡点 $E(1,1,1)$ ；当虚拟水企业和研究机构的合作意愿都很低时，政府应该开始迅速发挥其监管职能并进行相应的产业扶持，推动企业和研究机构进行创新，促成三方合作达成。

五、 结论与讨论

(一) 结论

本研究通过构建演化博弈模型，对虚拟水战略涉及的政产学研各方行为进行分析，主要结论如下：

(1) 虚拟水战略作为理论上可靠且可行的解决区域水资源分布不均问题的手段，在认识其作用和意义的前提下，政府、虚拟水企业及研究机构完全有可能形成围绕虚拟水战略稳定合作的均衡，但具体实现与否，则与各方的各项投入、产出和初始意愿有关。

(2) 各方在博弈中的成本-效益（即预期收益）会影响其策略选择。政府在博弈过程中对于选择合作策略的态度一般比较谨慎；企业受到政府和研究机构策略的影响较大；而研究机构的风险成本相对较小，收益相对稳定，可能导致其选择合作的动力不足。

(3) 对参与虚拟水产业创新合作的政产学研三方进行奖励，或降低其成本和失败的损失，都有助于增加各博弈方选择合作策略的稳定性。

（二）建议与讨论

根据以上分析，本文对虚拟水战略的落实提出以下建议：

（1）建立虚拟水相关产业阶梯式扶持机制。我国目前的虚拟水战略相关产业尚不成熟，企业进行虚拟水调度的风险较大^[21,29]，需要政府在政策和资金方面予以先期投入支持；但是从长期可持续发展的角度，应当提升虚拟水企业自身的创新盈利能力。根据虚拟水产业发展的现实情况，政府应设法随着时间提高企业创新的市场预期收益；根据各个企业创新强度、深度的差异，划分补贴标准，将单一补贴模式转变为补贴和研究平台建设、政务服务、市场引导并举的模式；引导不同企业和不同区域对虚拟水的生产链、产业网络做出合理布局，对当前热点和未来前瞻领域进行重点支持。

（2）培育行业典型示范企业。政府可以利用各家虚拟水企业之间存在市场竞争性的特点，从资源、市场、人才等方面对优秀企业进行聚焦，精准扶持虚拟水生产与调度示范企业，帮其减少创新成本与风险，提高创新发展为虚拟水企业带来的预期收益，使其他企业进一步认识到放弃创新的机会损失，以在地区和行业内形成带动效应。

（3）改进政产学研合作模式。传统的虚拟水产业各个合作方中，研究机构方的风险与成本相对较低，而政府和企业对虚拟水产业创新的初始动机不足。因此，可以适度将政府、企业方的创新成本和风险向研究机构转移，激发此博弈参与方的活性，将单纯的经费支持转为合作互利，积极推广人才培养合作、技术入股、平台共建等合作模式。

本研究所建立的博弈模型主要围绕政府、虚拟水企业、研究机构之间的互动关系，而虚拟水战略还涉及其他多种博弈问题：例如虚拟水产品的输出与输入地区之间也存在博弈关系，类似于碳排放交易中的跨区博弈^[2,15]；此外，还有上下级政府之间、不同企业之间围绕虚拟水战略的博弈等问题，这些都有待未来进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 程国栋.虚拟水——中国水资源安全战略的新思路[J].中国科学院院刊, 2003, 18(4): 260-265.
- [2] 郭本海, 李军强, 张笑腾. 多主体参与下中国光伏产业低端技术锁定突破问题研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2017, 19(4): 18-27.
- [3] 刘瑞文. 从博弈视角看流域跨界水环境政策执行困境[J]. 河北环境工程学院学报, 2022, 32(1): 9-13.
- [4] 王宏利, 董玟希, 周鹏. 跨省流域生态补偿长效机制研究——基于演化博弈的视角[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版), 2021, 19(4): 76-85.
- [5] 杨志峰, 支援, 尹心安. 虚拟水研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 181-190.
- [6] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海人民出版社, 2004.
- [7] 赵黎明, 刘猛, 郝琳娜. 基于创业链声誉的风险投资与风险企业合作的微分对策模型研究[J]. 管理工程学报, 2016, 30(1): 168-175.
- [8] 赵旭, 杨志峰, 陈彬. 基于投入产出分析技术的中国虚拟水贸易及消费研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 286 - 294.
- [9] 支援, 梁龙跃, 尹心安, 王秀峰, 王经绫. 基于信号传递博弈原理的虚拟水调度补贴策略研究[J]. 生态经济, 2017, 33(7): 134-139.
- [10] 钟太勇, 杜荣. 基于博弈论的新能源汽车补贴策略研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23: 817-822.
- [11] 周晨, 丁晓辉, 李国平, 汪海洲. 南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究——以生态系统服务价值为视角[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 792-804.
- [12] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible[J]. 1993.
- [13] Allan J A. Overall perspectives on countries and regions [M]. Massachusetts: Harvard University Press, 1994.
- [14] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products. Value of water research report series No.13 [R]. Delft: UNESCO-IHE, 2003.
- [15] Delpasand M, Bozorg-Haddad O, Goharian E, Loaiciga H A. Virtual water trade: Economic development and independence through optimal allocation[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: 108022.
- [16] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.
- [17] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of water research report series No.11 [R]. Delft: UNESCO-IHE. 2002.
- [18] Hoekstra A Y. Priorities for Water Resources Allocation and Management[R]. London: Official Development Assistance, 1993: 13-26.
- [19] Hoekstra A Y. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of water research report series No.12[R]. Delft: UNESCO-IHE, 2003.
- [20] Hou S H, Xu M, Qu S. The "Gravity" for global virtual water flows: From quantity and quality perspectives[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: 116984.
- [21] Lyapunov A M. The General Problem of the Stability of Motion[M]. Fuller A T trans. London: Taylor &

Francis, 1992.

- [22] Novoa V, Rojas O, Ahumada-Rudolph R, Arumi J L, Munizaga J, de la Barrera F, Cabrera-Pardo J R, Rojas C. Water footprint and virtual water flows from the Global South: Foundations for sustainable agriculture in periods of drought[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023: 161526.
- [23] Seekell D A, D'odorico P, Pace M L. Virtual water transfers unlikely to redress inequality in global water use [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(2): 024017.
- [24] Weiss E B, Slobodian L. Virtual water, water scarcity, and international trade law [J]. *Journal of International Economic Law*, 2014, 17(4): 717–737.
- [25] Wichelns D. Virtual water and water footprints do not provide helpful insight regarding international trade or water scarcity [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 277–283.
- [26] World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs [R]. Paris: UNESCO, 2016.
- [27] World Water Assessment Programme. Water for a Sustainable World [R]. Paris: UNESCO, 2015.
- [28] Yang H, Zehnder A. “Virtual water”: an unfolding concept in integrated water resources management [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(12): W12301.
- [29] Zhang Z Y, Shi M J, Yang H. Understanding Beijing’s water challenge: A decomposition analysis of changes in Beijing’s water footprint between 1997 and 2007 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 12373-12380.
- [30] Zhao Q B, Liu J G, Khabarov N, Obersteiner M, Westphal M. Impacts of climate change on virtual water content of crops in China [J]. *Ecological Informatics*, 2014, 19(1):26-34.
- [31] Zhao X, Chen B, Yang Z F. National water footprint in an IO framework - a case study of China 2002 [J]. *Ecological Modeling*, 2009, 220: 245-253.
- [32] Zhi Y, Hamilton P B, Wu G Y, Hong N, Liang L Y, Xiong D B, Sun Y Y. Virtual water indicator for comprehensive water pressures: model and case studies [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 608: 127664.

Multi-Agent Evolutionary Game Analysis of Government-Industrial-Research Cooperation in Virtual Water Strategy

Zhi Yuan¹ Li Caiju¹ Liang Longyue¹

(1 School of Economics, Guizhou University, Guiyang, Guizhou, 550025, China)

Abstract: Virtual water strategy is an effective complement to the entity water diversion project. It is an important mean to balance regional water resource endowments, guarantee the safety of water resources, and develop the management system of water resources. However, the methods to adjust the relationship between the government, virtual water enterprises and research institute, and to achieve breakthroughs in innovation remain to be studied. This study builds a multi-agent evolutionary game model to analyze the development of virtual water strategy. Focusing on the interactive relationship between government, enterprise and research institution in the industry of virtual water, this study constructs a multi-agent evolutionary game model, and explores their strategy mechanisms and the paths to improve their cooperation. The results show that due to the differences in initial willingness to cooperate and factors affecting payoffs, the evolutionary game appear two possible equilibriums: stable cooperation, or the government and enterprise refuse to cooperate. Therefore, to promote the development of virtual water strategy, the government should build the multistep support mechanism for virtual water industry, foster typical model enterprises, and optimize the cooperation framework to stimulate the innovation activity of the research institutions.

Key words: virtual water; government-industrial-research cooperation; evolutionary game; water resources