

DOI: 10.5846/stxb202002100220

杜元伟,孙浩然,王一凡,万晓乐.海洋牧场生态安全监管的演化博弈模型及仿真.生态学报,2021,41(12):4795-4805.

Du Y W, Sun H R, Wang Y F, Wan X L. Evolutionary game model and simulation for supervising ecological security of marine ranching. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12):4795-4805.

海洋牧场生态安全监管的演化博弈模型及仿真

杜元伟,孙浩然,王一凡,万晓乐*

中国海洋大学管理学院, 青岛 266100

摘要:海洋牧场生态安全监管是由政府部门对海洋牧场企业的资源开发利用、环境治理保护等行为进行监督和管理,保证海洋牧场海域的资源与环境符合生态安全需要,其对实现海洋牧场的环境保护、资源养护和渔业持续产出功能具有重要作用。首先分析了海洋牧场生态安全监管中的参与主体为政府部门和海洋牧场企业,然后从监管与不监管、重视与不重视两个维度构建了海洋牧场生态安全监管博弈参与主体的策略集合及收益矩阵,在此基础上结合复制动态方程和雅可比矩阵求解了海洋牧场生态安全监管博弈中演化稳定策略并进行了稳定性分析和模拟仿真,最后提出了海洋牧场生态安全监管的对策建议。研究结果表明,对海洋牧场企业不重视生态安全行为的惩罚力度、政府部门从发现企业不重视生态安全中获取的收益、外界监督力量监督成功的概率是影响演化博弈结果的重要因素。据此提出“加大对海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全行为的处罚力度、提高政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时的收益、建立健全海洋牧场生态安全监管机制、发挥外界监督力量的作用”等政策建议,以维护我国海洋牧场生态安全。

关键词:海洋牧场;生态安全;监管行为;演化博弈;仿真

Evolutionary game model and simulation for supervising ecological security of marine ranching

DU Yuanwei, SUN Haoran, WANG Yifan, WAN Xiaole*

Management College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The supervision on ecological security of marine ranching (MRESS) refers to the supervision and management for the behavior of marine ranching enterprises (e.g., development and utilization of resources, governance and protection of environment, etc.) by government departments to ensure that the resources and environment in the areas of marine ranching meet the needs of ecological security. The MRESS has great influences on realizing the functions of marine ranching such as environmental protection, resource conservation, and fisheries' sustainable production. Firstly, the participants involved in the game of MRESS are analyzed to be government departments and marine ranching enterprises, and then their strategy sets within a revenue matrix are introduced from two dimensions of “making supervision or not” and “paying attention or not”. The evolutionarily stable strategies in the game of MRESS are solved by employing duplicate dynamic equations and jacobian matrices, based on which the stability analysis and simulation of solutions are both implemented and the suggestions for MRESS are also presented. The results reveal that the critical influence factors in the game of MRESS include the penalties to marine ranching enterprises which are careless to ecological security, the revenues of government departments on the MRESS, and the probabilities of successful surveillance by the external supervision forces. Accordingly, the MRESS suggestions are proposed to help protect the ecological security of marine ranching, e.g., strengthening penalties for those

基金项目:国家社科基金重大项目(18ZDA055)

收稿日期:2020-02-10; 网络出版日期:2021-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanxiaole@ouc.edu.cn

careless marine ranching enterprises, increasing the revenues of government departments, constructing and improving the mechanism for MRESS, performing the external supervision forces' duties.

Key Words: marine ranching; ecological security; supervision; evolutionary game; simulation

随着海洋经济的高速增长,我国海洋牧场建设也进入了快速发展阶段^[1]。截至目前,我国农业农村部先后批准设立了 6 批共计 136 个国家级海洋牧场示范区,并为每个示范区提供 2500 万元的建设资金。海洋牧场是我国推动渔业新旧动能转换的重要途径,但受自然灾害、海域污染等多方面影响,近年来我国海洋牧场生态安全事件时有发生。如:2013 年山东省招远市长时间高温和降水,造成其所辖海洋牧场海参区大量生物死亡;浙江舟山海洋牧场养殖海域污染严重,近年来海洋赤潮多达 16 次,污染面积超过了 2800km²;渤海湾天津区域饱受近岸水体富营养化、高温高盐水污染等问题困扰,其海洋牧场发展前景堪忧。

纵观国内外相关研究成果,目前已有学者在海洋牧场生态保护、海洋生态安全和生态环境监管等领域开展了一些相关研究工作。其一,在海洋牧场生态作用方面,现有研究主要集中在分析海洋牧场生态环境以及人工养殖、增殖放流等行为对海洋牧场生态的影响。如:Grant 等^[2]介绍了海洋鱼类和无脊椎动物的封闭养殖、种群恢复、海洋牧场和种群改良取得的成果,分析了孵化场饲养的个体对野生种群的替代作用,提出了一种有利于保护遗传多样性的资源管理办法;Lee 等^[3]利用生态系统模型,对韩国统营海洋牧场生态系统的结构和功能进行评价,比较了海洋牧场活动前后不同生态系统组成的变化;Kitada^[4]评估了全球海洋资源增殖和海洋牧场建设的积极和消极影响,分析了世界范围内海洋资源增殖和海洋牧场活动的现状,并为海洋资源的人工繁殖和保护提供了重要信息;高春梅等^[5]分析了海州湾海洋牧场海域表层沉积物林的形态及其环境意义。其二,在海洋生态安全方面,现有研究主要集中在分析生态安全内涵特征、影响因素、路径对策方面。如:Ban 等^[6]分析了全球 12 个成功的大型海洋保护区在社会、生态和管理方面的特点,探究了大型海洋保护区的社会福利和生态绩效的影响因素;Huang 等^[7]以厦门河口为例,研究了生态系统服务功能退化引起的生态安全问题,提出了生态服务评价指标体系、评价标准和权重确定方法;Pita 等^[8]从经济、社会和生态影响等方面对西班牙加利西亚自治区的海洋休闲渔业进行了综合分析,并为提高海洋休闲渔业的社会生态可持续性提供了政策建议;易爱军^[9]分析了海洋生态安全的内涵和特征,阐述了维护海洋生态安全的重要意义,在此基础上提出了维护我国海洋生态安全的路径及对策。其三,在生态环境监管方面,现有研究大多集中于各国政府为加强生态安全监管所采取的措施方面。如:Sneve 等^[10]介绍了挪威政府和俄罗斯政府为加强对核与辐射安全进行监管而开发的监管标准和评估体系,回顾了两国政府在该合作计划实施过程中取得的经验和教训;Shen 等^[11]基于演化博弈探究了能够鼓励企业积极防范雾霾的政府监管机制,认为长期监管机制优于集中监管机制;卞靖等^[12]分析了我国加强生态安全监管的紧迫性和必要性,并结合国外流域生态安全监管体系经验为我国生态安全混合监管体系建设提供了政策建议;秦宇等^[13]基于我国生态环境大数据建设背景探讨了生态环境的信息安全监管问题,设计了环境信息安全监管体系。

国内外学者已在海洋牧场生态作用、海洋生态安全和生态环境监管等领域开展了一系列的研究工作,这些成果对开展海洋牧场生态安全监管问题的研究具有重要参考价值。然而,目前尚未发现有关海洋牧场生态安全监管的直接研究成果,或者说该领域的研究仍属空白。

1 海洋牧场生态安全监管的概念内涵与管理现状

海洋牧场生态安全是海洋牧场人工生态系统的资源结构和海域环境能够维持环境保护、资源养护和渔业持续产出功能的整体平衡状态。海洋牧场生态安全监管是指为了保证海洋牧场海域的资源与环境符合生态安全需要,而由政府管理部门对海洋牧场企业的资源开发利用、环境治理保护等行为进行的监督和管理。海洋牧场生态安全监管的内涵较为广泛,既包括对海洋牧场的生物资源、海域环境等状态性指标而进行监督的

活动(如海水水质标准、目标生物资源量、生物多样性指数等),又包括对相关企业为维护海洋牧场生态安全所采取措施而进行管理的活动(如环境污染治理重视程度、环保经费投入数量、增殖放流是否存在外来物种入侵风险等)。其中:监督活动能够从结果层面反映政府部门在海洋牧场生态安全监管方面取得的实际效果,管理活动能够从原因层面揭示相关企业对落实海洋牧场生态安全监管工作的重视程度,二者关系可由图 1 予以表示。

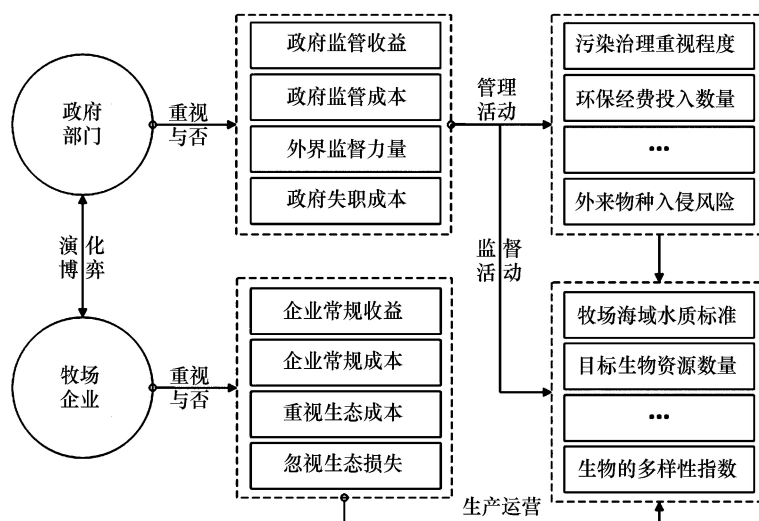


图 1 海洋牧场生态安全监管的概念框架图

Fig.1 Conceptual framework for supervising marine ranching ecological security (MRES)

我国政府已陆续出台了《国家级海洋牧场示范区管理工作规范(试行)》《国家级海洋牧场示范区年度评价及复查办法(试行)》等管理办法,其中明确了海洋牧场的监管主体及职责——农业农村部主管示范区工作,组织开展示范区年度评价及复查工作;省级渔业主管部门负责辖区内示范区年度评价工作,并组织开展示范区资源养护效果评价工作;县级以上渔业主管部门负责对辖区内示范区年度工作报告进行审核,并组织开展示范区年度监测工作。虽然在上述出台的管理办法中涉及了一些诸如海水水质标准、目标生物资源量、生物多样性指数等一些对海洋牧场生态效益进行评价的指标,但是尚未深入到海洋牧场生态安全监管机制该如何构建的问题。

考虑到演化博弈是将博弈论和动态演化过程相结合的一种分析模型^[14],能够研究系统中存在多个有限理性主体、主体之间存在竞合和制衡关系的群体演化动态选择过程,并已在生态治理^[15-17]、食品安全^[18-20]、协同创新等^[21-23]诸多领域得到了成功应用,因此本文基于演化博弈方法对海洋牧场生态安全监管行为进行研究,以期为我国海洋牧场生态安全监管机制的构建提供理论依据。本文首先通过分析海洋牧场生态安全监管中的参与主体、策略集合、收益矩阵构建演化博弈模型,然后基于复制动态方程求解能够协调政府部门和海洋牧场企业之间关系的演化稳定策略,最后对演化博弈过程进行数值仿真分析提出有利于实现我国海洋牧场生态安全有效监管的政策建议。

2 指标筛选与演化博弈模型构建

2.1 指标筛选及建模

遵循演化博弈的基本原理,海洋牧场生态安全监管的演化博弈首先需明确系统中存在哪些博弈参与主体,然后分析各类主体的策略集合,最后通过构建各个主体在每种策略上的收益函数实现对演化博弈模型的构建。需要强调的是,在上述建模过程中,明确参与主体在海洋牧场生态安全监管中的博弈行为会涉及哪些指标,对演化博弈模型的构建(特别是收益矩阵的构建)具有重要作用。

在参与主体方面,海洋牧场生态安全监管主要包括两个主体——政府部门和海洋牧场企业。其中:政府部门作为海洋牧场的直接管理者,需要对海洋牧场企业在开发利用海洋资源和海洋生态环境、破坏海洋生态系统等活动进行监管,故是海洋牧场生态安全监管的管理主体;海洋牧场企业作为海洋牧场的生产经营者,其生产捕捞、施工作业等活动会对确权海域的生态造成直接污染,故是海洋牧场生态安全监管的受制主体。

在策略集合方面,政府和企业在对海洋牧场进行生态安全监管的过程中均为有限理性的行为主体,都会朝着有利于自身利益的方向开展决策,二者之间实际上是一种博弈关系。显然,在博弈的过程中,海洋牧场企业的策略选择是重视或不重视海洋牧场生态安全,而政府部门的策略选择是对海洋牧场企业进行监管或不监管,双方通过不断学习和试错寻找较优的策略。

在收益函数方面,海洋牧场企业为追求短期利益最大化可能倾向于不重视海洋牧场生态安全问题,而政府部门则从长远利益出发要求其重视海洋牧场生态安全,但因其监管能力有限,无法对所有海洋牧场企业进行全过程、全要素、全覆盖的监管。若政府部门选择不进行监管,由于存在媒体、专家、学者等外界监督力量,政府监管失职会使其自身利益受损。

政府和企业两类参与主体在进行监管博弈过程中会产生一系列的收益和成本,具体可以通过企业常规收益(R_1)、企业常规成本(C_1)、重视生态成本(C_2)、忽视生态损失(C_4)、政府监管收益(R_2)、政府监管成本(C_3)、监督成功概率(α)、政府失职成本(C_5)等指标进行衡量。上述相关指标及含义具体表1所示。

表1 动态演化博弈过程中的指标及含义

Table 1 Index with meaning in dynamic evolution game process

指标 Index	含义 Meaning	指标 Index	含义 Meaning
企业常规收益(R_1) The enterprise income from normal operations	海洋牧场企业销售商品和提供服务的收益	政府监管收益(R_2) The supervision benefit of the government	政府部门发现海洋牧场企业不重视生态安全时的收益
企业常规成本(C_1) The enterprise cost from normal operations	海洋牧场企业销售商品和提供服务的成本	政府监管成本(C_3) The supervision cost of the government	政府部门对海洋牧场企业进行监管的成本
重视生态成本(C_2) The cost of the enterprise for revering ecological security	海洋牧场企业重视生态安全时付出的成本	监督成功概率(α) The probability of successful supervision by external force	外界监督力量监督成功的概率
忽视生态损失(C_4) The loss of the enterprise for neglecting ecological security	海洋牧场企业被发现不重视生态安全时产生的成本	政府失职成本(C_5) The cost of government for administrative omission	政府部门若被外界监督力量发现不监管时付出的成本

基于对参与主体、策略集合、收益函数等要素的特征分析,并结合表1中两类参与主体在监管博弈过程中的收益和成本指标,本文提出海洋牧场生态安全监管博弈过程中的如下假设。

假设1:海洋牧场企业选择重视生态安全的比例为 x ,不重视的比例为 $1-x$, $0 \leq x \leq 1$;政府部门对海洋牧场企业进行生态安全监管的比例为 y ,不监管的比例为 $1-y$, $0 \leq y \leq 1$ 。

假设2:海洋牧场企业销售商品和提供服务的收益为 R_1 ,进行生产和服务的成本为 C_1 ,为重视海洋牧场生态安全而付出的成本为 C_2 (如污染治理费用、信息化建设费用等),企业为不重视海洋牧场生态安全而产生的成本为 C_4 (如被发现不重视而产生的罚款、商誉损失以及由于外来物种入侵造成的直接/间接损失等)。

假设3:政府部门发现海洋牧场企业不重视生态安全的收益为 R_2 (即使政府部门选择不进行监管,只要不出现海洋牧场生态安全问题,群众会默认政府已经尽责,此时政府部门仍获得收益 R_2),政府部门进行监管的成本为 C_3 。

假设4:存在外界监督力量(如媒体、专家、学者等),其监督成功的概率为 α , $0 \leq \alpha \leq 1$ 。政府部门若不对海洋牧场企业的生态安全进行监管,一旦被外界监督力量发现,其需要付出的成本为 C_5 (如政府公信力下降、上级部门问责等)。

遵循上述假设,可以得到政府部门与海洋牧场企业在海洋牧场生态安全监管博弈中的收益矩阵,具体如

表 2 所示。

2.2 模型分析

2.2.1 演化过程的均衡点

由表 2 可知,海洋牧场企业选择重视、不重视海洋牧场生态安全的期望收益 U_0^1 、 U_0^2 及海洋牧场企业的平均收益 $\bar{U}_0$ 分别为:

$$\begin{aligned} U_0^1 &= y(R_1 - C_1 - C_2) + (1 - y)(R_1 - C_1 - C_2) \\ U_0^2 &= y(R_1 - C_1 - C_4) + (1 - y)(R_1 - C_1 - \alpha C_4) \\ \bar{U}_0 &= x U_0^1 + (1 - x) U_0^2 \end{aligned}$$

表 2 海洋牧场生态安全监管博弈双方的收益矩阵

Table 2 Benefit matrix of the game participants

海洋牧场企业 Marine ranching enterprises	政府部门 Government departments	
	监管 Supervision	不监管 Non-supervision
重视 Attention	$R_1 - C_1 - C_2, R_2 - C_3$	$R_1 - C_1 - C_2, R_2$
不重视 Non-attention	$R_1 - C_1 - C_4, R_2 - C_3$	$R_1 - C_1 - \alpha C_4, (1 - \alpha)R_2 - \alpha C_5$

同理可得,政府部门选择进行、不进行监管的期望收益 U_1^1 、 U_1^2 及政府部门的平均收益 $\bar{U}_1$ 分别为:

$$\begin{aligned} U_1^1 &= x(R_2 - C_3) + (1 - x)(R_2 - C_3) \\ U_1^2 &= xR_2 + (1 - x)[(1 - \alpha)R_2 - \alpha C_5] \\ \bar{U}_1 &= y U_1^1 + (1 - y) U_1^2 \end{aligned}$$

复制动态是描述某一特定策略在一个种群中被采用的频度或频数的动态微分方程。为反映博弈双方的学习速度和方向,本文根据 Malthusian 动态方程^[24],海洋牧场企业重视海洋牧场生态安全的策略数量的增长率等于 $U_0^1 - \bar{U}_0$, t 为时间,整理得其复制动态方程 $F(x)$:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_0^1 - \bar{U}_0) = x(1 - x)[-C_2 + (\alpha + y - \alpha y)C_4]$$

同理,政府部门进行监管的复制动态方程 $F(y)$:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_1^1 - \bar{U}_1) = y(1 - y)[(\alpha - \alpha x)R_2 - C_3 + (\alpha - \alpha x)C_5]$$

动力系统(Dynamical System)是一个数学概念,常被用来描述空间中的一个点随时间的演化情况。本文为研究博弈双方的博弈策略随时间的演化情况,根据上述博弈双方的复制动态方程得二维动力系统 S (以下简称“系统 S ”):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(1 - x)[-C_2 + (\alpha + y - \alpha y)C_4] \\ \frac{dy}{dt} = y(1 - y)[(\alpha - \alpha x)R_2 - C_3 + (\alpha - \alpha x)C_5] \end{cases}$$

为便于分析系统 S 的均衡点和稳定性,令 $x_0 = \frac{\alpha(R_2 + C_5) - C_3}{\alpha(R_2 + C_5)}, y_0 = \frac{C_2 - \alpha C_4}{(1 - \alpha)C_4}$ 。

命题 1 二维动力系统 S 的 5 个局部均衡点分别为 $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$ 和 (x_0, y_0) 。

证明:在二维动力系统 S 中,令 $F(x) = \frac{dx}{dt} = 0, F(y) = \frac{dy}{dt} = 0$, 可得该系统的 5 个局部均衡点分别为 $(0,$

$0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$ 和 (x_0, y_0) 。

2.2.2 均衡点的稳定性分析

演化稳定策略(Evolutionarily Stable Strategy, ESS)的核心思想是^[25],“如果一个现存策略是演化稳定均

衡策略,那么必须存在一个正的入侵障碍,使得当变异策略的频率低于这个障碍时,现存的策略能够比变异策略获得更高的收益。”复制动态方程求出的均衡点不一定是系统的演化稳定策略(ESS),根据 Friedman^[26]提出的方法,演化稳定策略可以从系统的雅可比矩阵(记为 J)的局部稳定分析导出。对 $F(x)$ 和 $F(y)$ 依次求 x 和 y 的偏导数,可得该系统的雅可比矩阵:

$$J = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$$

其中, $A_{11} = (1 - 2x)[-C_2 + (\alpha + y - \alpha y)C_4]$

$$A_{12} = x(1 - x)(1 - \alpha)C_4$$

$$A_{21} = -y(1 - y)(\alpha R_2 + \alpha C_5)$$

$$A_{22} = (1 - 2y)[(\alpha - \alpha x)R_2 - C_3 + (\alpha - \alpha x)C_5]$$

当系统局部均衡点满足以下两个条件时,则称其为演化稳定策略(ESS):

条件 1: $\text{tr}J = A_{11} + A_{22} < 0$ (迹条件)

条件 2: $\det J = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} > 0$ (雅可比行列式条件)

系统 S 的 5 个局部均衡点的取值如表 3 所示。

表 3 局部均衡点处 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 、 A_{22} 的取值

Table 3 Values of A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 、 A_{22} at the local equilibrium points

局部均衡点 Local equilibrium point	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}
(0,0)	$-C_2 + \alpha C_4$	0	0	$\alpha R_2 - C_3 + \alpha C_5$
(0,1)	$-C_2 + C_4$	0	0	$-(\alpha R_2 - C_3 + \alpha C_5)$
(1,0)	$-(-C_2 + \alpha C_4)$	0	0	$-C_3$
(1,1)	$-(-C_2 + C_4)$	0	0	C_3
(x_0, y_0)	0	A	B	0

其中 A 和 B 的具体表达式分别为:

$$A = \frac{[\alpha(R_2 + C_5)C_3 - C_3^2](1 - \alpha)C_4}{\alpha^2(R_2 + C_5)^2}$$

$$B = \frac{[C_2^2 - (\alpha + 1)C_2C_4 - \alpha C_4^2][\alpha(R_2 + C_5)]}{(1 - \alpha)^2 C_4^2}$$

在均衡点 (x_0, y_0) 处由于 $A_{11} + A_{22} = 0$, 不满足条件 1, 因此该局部均衡点一定不是 ESS。所以, 只需要考虑其他 4 个局部均衡点的情况。结合前文所述的判断方法, 可得雅可比矩阵 J 在各个局部均衡点处的迹和行列式的值并判断局部稳定性。

命题 2 (1) 当 $C_4 < C_2$ 且 $R_2 < \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 或者当 $C_2 < C_4 < \frac{C_2}{\alpha}$ 且 $R_2 < \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 时, 系统 S 的稳定演化策略 ESS 为 (0, 0);

(2) 当 $C_4 < C_2$ 且 $R_2 > \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 时, 系统 S 的稳定演化策略 ESS 为 (0, 1);

(3) 当 $C_2 < C_4 < \frac{C_2}{\alpha}$ 且 $R_2 > \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 时, 系统 S 不存在稳定演化策略 ESS;

(4) 当 $C_4 > \frac{C_2}{\alpha}$ 且 $R_2 < \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 或者当 $C_4 > \frac{C_2}{\alpha}$ 且 $R_2 > \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 时, 系统 S 的稳定演化策略 ESS 为 (1, 0)。

证明:根据二维动力系统 S , 可得雅可比矩阵 J 各个局部均衡点处迹和行列式的值, 并判断局部稳定性。命题 2 中的情况 (2) 和情况 (3) 分别如表 4 和表 5 所示, 其他情况的演化稳定性判断方法一致, 不予赘述。

综合上述 4 种情况, 不同条件下的 ESS 归纳如表 6 所示。根据表 6 可知, 当海洋牧场企业被发现不重视海洋牧场生态安全而产生的成本很小或较小且政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全产生的收益较小时, 此时系统的 ESS 为 (0, 0), 在这种情况下海洋牧场企业趋向于选择不重视海洋牧场生态安全、政府部门趋向于选择不进行监管, 为便于分析, 本文将此种情况定义为“双方被动型”情景; 当海洋牧场企业被发现不重视海洋牧场生态安全而产生的成本很小且政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全产生的收益较大时, 此时系统的 ESS 为 (0, 1), 在这种情况下海洋牧场企业趋向于选择不重视海洋牧场生态安全、而政府部门趋向于选择进行监管, 为便于分析, 本文将这种情况定义为“政府主动型”情景; 当海洋牧场企业被发现不重视海洋牧场生态安全而产生的成本较小且政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全产生的收益较大时, 此时系统处于周期波动状态, 无 ESS, 在这种情况下海洋牧场企业和政府部门的行为都无法趋向于一个稳定点, 此时系统处于周期波动的状态, 为便于分析, 本文将这种情况定义为“双方波动型”情景; 当海洋牧场企业被发现不重视海洋牧场生态安全而产生的成本很大时, 不论政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时产生的收益的大小, 此时系统的 ESS 都为 (1, 0), 在这种情况下海洋牧场企业趋向于选择重视海洋牧场生态安全、政府部门趋向于选择不进行监管, 为便于分析, 本文将这种情况定义为“企业主动型”情景。

表 4 情况 (2) 的局部稳定性分析

Table 4 Local stability analysis of case (2)

局部均衡点 Local equilibrium point	trJ	$detJ$	稳定性 Stability
(0, 0)	不确定	-	鞍点
(0, 1)	-	+	ESS
(1, 0)	不确定	-	鞍点
(1, 1)	+	+	不稳定点

表 5 情况 (3) 的局部稳定性分析

Table 5 Local stability analysis of case (3)

局部均衡点 Local equilibrium point	trJ	$detJ$	稳定性 Stability
(0, 0)	不确定	-	鞍点
(0, 1)	不确定	-	鞍点
(1, 0)	不确定	-	鞍点
(1, 1)	不确定	-	鞍点

表 6 不同条件下的 ESS 归纳

Table 6 Induction of ESS under different conditions

条件 Condition	ESS	条件 Condition	ESS
$C_4 < \frac{C_2}{\alpha}, R_2 < \frac{C_3}{\alpha} - C_5$	(0, 0)	$C_2 < C_4 < \frac{C_2}{\alpha}, R_2 > \frac{C_3}{\alpha} - C_5$	无
$C_4 < C_2, R_2 > \frac{C_3}{\alpha} - C_5$	(0, 1)	$C_4 > \frac{C_2}{\alpha}$	(1, 0)

3 演化仿真研究

为更好的研究政府部门和海洋牧场企业在不同情况下的演化稳定策略, 本文通过海洋牧场企业为重视海

海洋牧场生态安全而付出的成本 C_4 和政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时的收益 R_2 这两个参数设置不同的取值(基于现实管理问题的特点和相关文献^[27,28]),运用 Matlab 软件进行数值仿真,分析不同情景下 4 个局部均衡点成为 ESS 的可能性。

(1)“双方被动型”情景:当 $C_4 < C_2$ 且 $R_2 < \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 或者当 $C_2 < C_4 < \frac{C_2}{\alpha}$ 且 $R_2 < \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 时,系统 S 的稳定演化策略 ESS 为 $(0,0)$ 。

假设 $\alpha=0.5$, $C_2=10$, $C_3=8$, $C_5=10$, $C_4=8$, $R_2=4$, $x=0.9$, $y=0.9$ 符合情况(1)前者要求,假设 $\alpha=0.5$, $C_2=10$, $C_3=8$, $C_5=10$, $C_4=19$, $R_2=4$, $x=0.9$, $y=0.9$ 符合情况(1)后者要求。这种情况下演化仿真得到的结果如图 2 所示,随着迭代步数的增加,重视海洋牧场生态安全的海洋牧场企业的比例和进行监管的政府部门的比例都不断下降,最后二者互动行为演化的稳定点为 $(0,0)$ 。

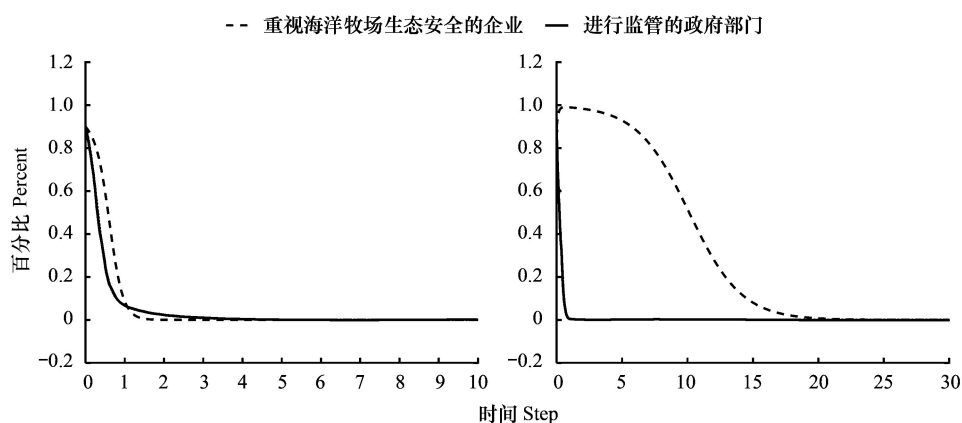


图 2 情况(1)的演化仿真趋势图

Fig.2 Evolution simulation trend chart of case (1)

由图 2 可知,在情况(1)中,由于海洋牧场企业被发现不重视海洋牧场生态安全而产生的成本很小或较小且政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全产生的收益较小,海洋牧场企业都将趋向于不重视海洋牧场生态安全,而政府部门则都将趋向于不进行监管。在这种情况下系统将锁定在一个充斥着不重视海洋牧场生态安全的失败状态,系统或将进入海洋牧场生态安全事件的高发期。

(2)“政府主动型”情景:当 $C_4 < C_2$ 且 $R_2 > \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 时,系统 S 的稳定演化策略 ESS 为 $(0,1)$ 。

假设 $\alpha=0.5$, $C_2=10$, $C_3=8$, $C_5=10$, $C_4=8$, $R_2=8$, $x=0.9$, $y=0.9$ 符合情况(2)要求。这种情况下演化仿真得到的结果如图 3 所示,随着迭代步数的增加,重视海洋牧场生态安全的海洋牧场企业的比例不断下降,进行监管的政府部门的比例则为总体上升趋势,最后二者互动行为演化的稳定点为 $(0,1)$ 。

由图 3 可知,在情况(2)中,由于海洋牧场企业被发现不重视海洋牧场生态安全而产生的成本小于其为重视海洋牧场生态付出的成本,它将趋向于不重视海洋牧场生态安全;政府部门由于发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时产生的收益较大,故它将最终趋向于进行监管。

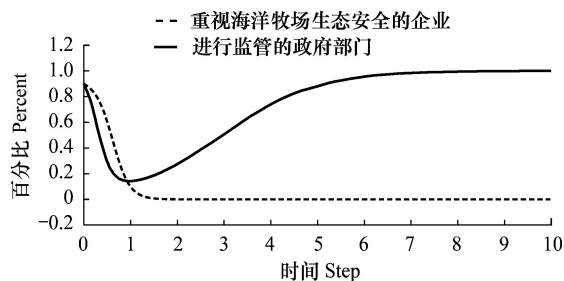


图 3 情况(2)的演化仿真趋势图

Fig.3 Evolution simulation trend chart of case (2)

(3)“双方波动型”情景:当 $C_2 < C_4 < \frac{C_2}{\alpha}$ 且 $R_2 > \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 时,系统 S 不存在稳定演化策略 ESS。

假设 $\alpha=0.5$, $C_2=10$, $C_3=8$, $C_5=10$, $C_4=19$, $R_2=8$, $x=0.9$, $y=0.9$ 符合情况(3)要求。这种情况下演化仿真得到的结果如图 4 所示,随着迭代步数的增加,重视海洋牧场生态安全的海洋牧场企业的比例和进行监管的政府部门的比例上下波动,且二者变化趋势一致,此时不存在演化稳定策略 ESS。

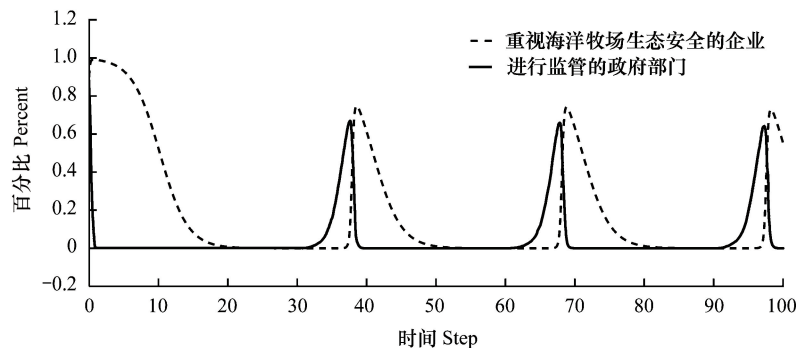


图 4 情况(3)的演化仿真趋势图

Fig.4 Evolution simulation trend chart of case (3)

由图 4 可知,在情况(3)中,海洋牧场企业被发现不重视海洋牧场生态安全而产生的成本较小,政府部门由于发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时产生的收益较大,海洋牧场企业和政府部门的行为都无法趋向于一个稳定点,此时系统处于周期波动的状态,同时选择进行监管的政府部门的比例与选择重视海洋牧场生态安全的海洋牧场企业的比例的变化趋势一致。结合实际情况认为,我国政府部门多采用运动式监管模式^[29,30]:例如在春节、国庆节等重要节假日前后加强对海洋牧场企业的检查,或在发生重特大海洋牧场生态安全事故后进行全面排查,这导致了特定时期的监管过度,更多时期的监管不足。

(4)“企业主动型”情景:当 $C_4 > \frac{C_2}{\alpha}$ 且 $R_2 < \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 或者当 $C_4 > \frac{C_2}{\alpha}$ 且 $R_2 > \frac{C_3}{\alpha} - C_5$ 时,系统 S 的稳定演化策略 ESS 为(1,0)。

假设 $\alpha=0.5$, $C_2=10$, $C_3=8$, $C_5=10$, $C_4=22$, $R_2=4$, $x=0.9$, $y=0.9$ 符合情况(4)前者要求,假设 $\alpha=0.5$, $C_2=10$, $C_3=8$, $C_5=10$, $C_4=22$, $R_2=8$, $x=0.9$, $y=0.9$ 符合情况(4)后者要求。这种情况下演化仿真得到的结果如图 5 所示,随着迭代步数的增加,重视海洋牧场生态安全的企业的比例不断上升,进行监管的政府部门的比例不断下降,最后二者互动行为演化的稳定点为(1,0)。

由图 5 可知,在情况(4)中,海洋牧场企业由于不重视海洋牧场生态安全而产生的高昂成本,它将趋向于重视海洋牧场生态安全,而此时政府部门不论发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时产生的收益的大小,它都将趋向于不进行监管。在这两种情况中,由于高昂的不重视成本,海洋牧场企业都能够自觉重视海洋牧场生态安全,这能为政府部门节省大量的人力、物力和财力,降低其监管成本,是政府部门最愿意看到的情况。

上述四种场景的演化仿真结果表明:①惩罚力度是影响海洋牧场企业是否重视海洋牧场生态安全的关键因素。当海洋牧场企业被发现不重视海洋牧场生态安全而产生的成本较小时,海洋牧场企业趋向于不重视;反之,当加大惩罚力度时,海洋牧场企业则趋向于选择重视海洋牧场生态安全。②政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时的收益大小对其行为选择具有重要影响。当政府部门从监管中获得的收益较小时,它将趋向于不进行监管;反之,当政府部门从监管中获得的收益较大时,它将趋向于进行监管。③外界监督力量监督成功的概率在特定情况下对政府部门的收益具有重要影响。当海洋牧场企业选择不重视海洋牧场生态安全且政府部门选择不进行监管时,此时政府部门的期望收益会随着外界监督力量监督成功的概率

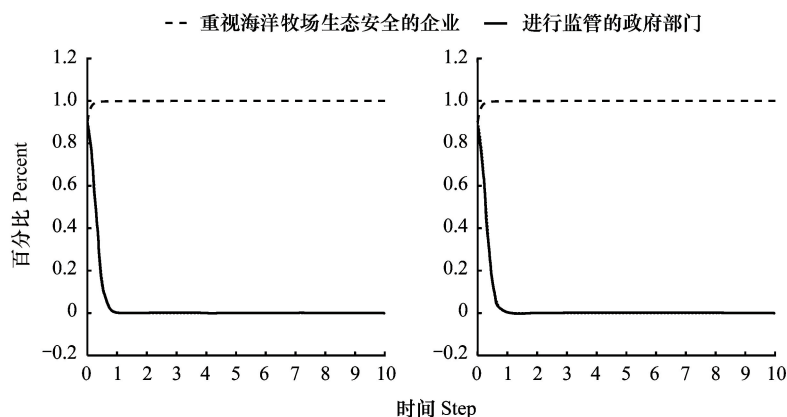


图5 情况(4)的演化仿真趋势图

Fig.5 Evolution simulation trend chart of case (4)

的提高而下降。

4 结论与讨论

本文基于演化博弈理论研究了政府部门和海洋牧场企业对生态安全的行为选择问题,分析了二者在海洋牧场生态安全监管中的稳定策略,最后利用数值仿真得到了不同参数下模型的演化趋势、演化结果及其影响因素。本文研究主要有以下特点:一是将演化博弈引入海洋牧场生态安全监管。在有限理性假设的基础上,将海洋牧场生态安全监管视为一个渐进的动态学习过程,通过构建企业行为和政府行为的演化博弈模型,分析了演化博弈的均衡点及稳定性,探讨了不同情况下企业和政府行为的演化稳定策略。二是运用数值仿真对演化趋势和演化结果进行了模拟。通过为海洋牧场企业为重视海洋牧场生态安全而付出的成本和政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时的收益这两个参数设置不同的取值,运用 Matlab 软件对模型进行了演化仿真研究,并结合演化趋势图分析了不同情况下监管过程的演化趋势。三是考虑了外界监督力量对政府部门的影响。本文在构建博弈双方的收益矩阵时考虑了当海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全且政府部门不监管时外界监督力量监督对政府部门收益的影响,使研究结果能够更贴近现实中海洋牧场企业与政府部门的真实行为选择。

结合上述研究结果,本文提出以下海洋牧场生态安全监管的建议。一是加大对海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全行为的处罚力度。通过加大惩罚力度,提高海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全的成本,促使海洋牧场企业树立海洋牧场生态安全意识。二是提高政府部门发现海洋牧场企业不重视海洋牧场生态安全时的收益。建立科学完善的激励机制,通过物质奖励和非物质奖励(例如嘉奖、通报表扬)相结合的方式,引导政府部门积极进行监管。三是建立健全海洋牧场生态安全监管机制,发挥外界监督力量的作用。面对我国海洋牧场快速发展的现状,过度地依靠政府监管存在一定的难度,必须建立健全政府监管和外界力量监督的协同监管机制,才能有效维护我国海洋牧场生态安全。

需要指出的是,本文虽然并未直接考虑海洋动力灾害(如台风、风暴潮、海啸)和生态环境灾害(如赤潮、溢油)等因素对海洋牧场生态安全的影响,但在实际监管过程中对于上述灾害的应急处理效果亦能从企业对海洋牧场生态的重视程度和政府是否对海洋牧场生态安全进行及时监管两个层面予以一定程度的反映。在后续研究中,将上述自然灾害可能产生的影响更加精细地融入到海洋牧场生态安全监管的动态演化博弈中是一个值得探索的方向。

参考文献(References):

- [1] 国家发展改革委. 全国海洋经济发展“十三五”规划. 2017.

- [2] Grant W S, Jasper J, Bekkevold D, Adkison M. Responsible genetic approach to stock restoration, sea ranching and stock enhancement of marine fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2017, 27(3): 615-649.
- [3] Lee S I, Zhang C I. Evaluation of the effect of marine ranching activities on the tongyeong marine ecosystem. *Ocean Science Journal*, 2018, 53(3): 557-582.
- [4] Kitada S. Economic, ecological and genetic impacts of marine stock enhancement and sea ranching: a systematic review. *Fish and Fisheries*, 2018, 19(3): 511-532.
- [5] 高春梅, 朱珠, 王功芹, 张硕. 海州湾海洋牧场海域表层沉积物磷的形态与环境意义. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3437-3444.
- [6] Ban N C, Davies T E, Aguilera S E, Brooks C, Cox M, Epstein G, Evans L S, Maxwell S M, Nenadovic M. Social and ecological effectiveness of large marine protected areas. *Global Environmental Change*, 2017, 43: 82-91.
- [7] Huang H, Chen B, Ma Z Y, Liu Z H, Zheng S L, Yu W W, Liao J J, Hu W J, Du J G, Chen G C. Assessing the ecological security of the estuary in view of the ecological services- A case study of the Xiamen Estuary. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 137: 12-23.
- [8] Pita P, Hyder K, Gomes P, Pita C, Rangel M, Veiga P, Vingada J, Villasante S. Economic, social and ecological attributes of marine recreational fisheries in Galicia, Spain. *Fisheries Research*, 2018, 208: 58-69.
- [9] 易爱军. 我国海洋生态安全问题探讨. *环境保护*, 2018, 46(11): 55-58.
- [10] Sneve M K, Kiselev M, Shandala N K. Radio-ecological characterization and radiological assessment in support of regulatory supervision of legacy sites in northwest Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, 131: 110-118.
- [11] Shen L, Wang Y Y. Supervision mechanism for pollution behavior of Chinese enterprises based on haze governance. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 571-582.
- [12] 卞靖, 郭丽岩. 完善生态安全监管体系. *宏观经济管理*, 2014(9): 15-17.
- [13] 秦宇, 孙宇, 邢可佳, 温有越, 王一诺, 李晨. 基于生态环境大数据建设的环境信息安全监管体系研究. *环境保护*, 2018, 46(21): 56-60.
- [14] 郭本海, 李军强, 刘思峰. 县域间土地供给竞合关系演化博弈模型. *中国管理科学*, 2015, 23(12): 77-85.
- [15] 王广成, 曹飞飞. 基于演化博弈的煤炭矿区生态修复管理机制研究. *生态学报*, 2017, 37(12): 4198-4207.
- [16] 初钊鹏, 卞晨, 刘昌新, 朱婧. 雾霾污染、规制治理与公众参与的演化仿真研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(7): 101-111.
- [17] 潘鹤思, 李英, 柳洪志. 央地两级政府生态治理行动的演化博弈分析——基于财政分权视角. *生态学报*, 2019, 39(5): 1772-1783.
- [18] 晚春东, 秦志兵, 丁志刚. 消费替代、政府监管与食品质量安全风险分析. *中国软科学*, 2017(1): 59-69.
- [19] 曹裕, 余振宇, 万光羽. 新媒体环境下政府与企业在食品掺假中的演化博弈研究. *中国管理科学*, 2017, 25(6): 179-187.
- [20] 吕永卫, 霍丽娜. 网络餐饮业食品安全社会共治的演化博弈分析. *系统科学学报*, 2018, 26(1): 78-81.
- [21] 张健, 张威, 吴均. 战略性新兴产业共性技术协同创新的演化博弈——三重螺旋视阈下的研究. *企业经济*, 2017, 36(1): 41-48.
- [22] 李林, 袁也, 刘红. 协同创新主体合作的演化博弈及政府干预的仿真. *运筹与管理*, 2018, 27(6): 14-20.
- [23] 吴洁, 车晓静, 盛永祥, 陈璐, 施琴芬. 基于三方演化博弈的政产学研协同创新机制研究. *中国管理科学*, 2019, 27(1): 162-173.
- [24] Galor O, Weil D N. Population, technology, and growth: from Malthusian stagnation to the demographic transition and beyond. *American Economic Review*, 2000, 90(4): 806-828.
- [25] 黄凯南. 演化博弈与演化经济学. *经济研究*, 2009, 44(2): 132-145.
- [26] Friedman D. Evolutionary games in economics. *Econometrica*, 1991, 59(3): 637.
- [27] 浦徐进, 吴亚, 路璐, 蒋力. 企业生产行为和官员监管行为的演化博弈模型及仿真分析. *中国管理科学*, 2013, 21(S1): 390-396.
- [28] 于涛, 刘长玉. 政府与第三方在产品质量监管中的演化博弈分析及仿真研究. *中国管理科学*, 2016, 24(6): 90-96.
- [29] 刘鹏. 运动式监管与监管型国家建设: 基于对食品安全专项整治行动的案例研究. *中国行政管理*, 2015(12): 118-124.
- [30] 徐国冲, 张晨舟, 郭轩宇. 中国式政府监管: 特征、困局与走向. *行政管理改革*, 2019(1): 73-79.